

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЕЧЕНИИ ПУЧКА

УДК: 621.384.647: 539.124.18

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Серебренников Максим Анатольевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Егоров И. С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Винокурова Г.Ф.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР,

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Кривобоков В.П.

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Серебренникову Максиму Анатольевичу

Тема работы:

Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Импульсный ускоритель электронов «Астра-М»; 2. Температурные датчики MLX90614ESF-DCI, 61 шт; 3. Микроконтроллеры Arduino Nano V3.0, 4 шт; 4. Цифровой осциллограф Tektronix TDS 2024C; 5. Медь М1, лист 600х100 мм, толщина 0.5 мм; 6. Провод МГТФ-0.12 15 м; 7. Джамп-провода, 160 шт; 8. USB кабель, 20 м.
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения основных процессов, происходящих в веществе под действием электронного пучка, и определения достижений мировой науки и техники в области диагностики электронных пучков; 2. Постановка цели и задач научного исследования; 3. Разработка и испытание устройства для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка; 4. Обсуждение результатов проведенных исследований; 5. Заключение по проделанной работе.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка; 2. Device for determination of electron average kinetic energy in the cross section of the beam 3. Цель и задачи; 4. Метод измерения средней кинетической энергии электронов по сечению пучка; 5. Разработка конструкции; 6. Разработка конструкции: коллектор; 7. Разработка конструкции: блок датчиков и шунт ЦФ; 8. Сборка устройства; 9. Испытание системы измерения температуры; 10. 1-е защищаемое положение; 11. Исследование распределения энергии в сечении электронного пучка; 12. Оценка распределения энергии по сечению пучка; 13. Определение спектра кинетических энергий электронов; 14. Оценка распределения энергии по сечению пучка; 15. Оценка распределения средней кинетической энергии электронов по сечению пучка 16. 2-е защищаемое положение; 17. Заключение; 18. Список публикаций; 19. Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН, к.ф.н., Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Доцент ООД, к.т.н., Винокурова Г.Ф.
Иностранный язык	Старший преподаватель ОИЯ, Демидова О.М.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
3.1. Разработка и изготовление устройства для регистрации средней кинетической энергии в сечении пучка	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Егоров И. С.	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Серебренников Максим Анатольевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Серебренникову Максиму Анатольевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	– Амортизационные отчисления 4 110 руб. – Заработная плата (руководителя 56892 руб. в месяц, инженера 16462 руб. в месяц) – Бюджет затрат НИИ 329 629 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5,8 руб. за 1 кВт·ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27.1 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	– Сравнение с другими схожими разработками
2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет	– Иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – определение трудоемкости работ.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной платы исполнителей темы; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. Альтернативы проведения НИ
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Серебренников Максим Анатольевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Серебренникову Максиму Анатольевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Проектирование, изготовление и испытание устройства для измерения средней кинетической энергии электронов импульсного пучка в его сечении
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ; – ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования; – ГОСТ Р 52241-2004. Источники ионизирующего излучения радионуклидные закрытые. Классы прочности и методы испытаний; – ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума; – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»; – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов; – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность; – Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р 12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума; – токсичные и взрывоопасные вещества; – повышенный уровень вибрации; – воздействие электромагнитных полей (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.);

	<ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне; – повышенный уровень напряжения в цепи. – Использование средств индивидуальной и коллективной защиты.
3. Экологическая безопасность:	– попадание паров летучих соединений в атмосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – поражение электрическим током; – пожар; – взрыв; – поражение ионизирующим излучением; – наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является поражение электрическим током и ионизирующим излучением.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общих технических дисциплин	Винокурова Г.Ф.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Серебренников Максим Анатольевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа представлена на 135 листах машинописного текста, включает 52 иллюстрации, 31 таблицу, 53 источника литературы.

Ключевые слова: секционированный калориметр, цилиндр Фарадея, импульсный электронный пучок, тепловизионная диагностика, спектр кинетических энергий электронов пучка.

Объектом исследования является распределение электронов с разной средней кинетической энергии по сечению пучка.

Целью выпускной квалификационной работы является создание устройства для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка и его использование для исследования распределения электронов с разной средней кинетической энергией по сечению пучка импульсного электронного ускорителя.

Были поставлены и решены следующие задачи:

- расчет основных параметров, таких как проективный пробег электронов в секциях коллектора, тепловые потери с поверхности ячеек за счет теплопроводности, излучения, конвекции, время уравнивания температуры на противоположных сторонах секции после облучения электронным пучком, сопротивление шунта ЦФ и необходимая рассеиваемая резисторами мощность;
- разработка конструкции устройства;
- изготовление, сборка и калибровка прибора;
- исследование распределения электронов с разной средней кинетической энергией по сечению пучка импульсного электронного ускорителя;
- анализ полученных результатов.

Испытания разработанного устройства показали возможность его использования для диагностики импульсного электронного пучка. Ошибка

измерений полной энергии пучка электронов секционированным калориметром не превышает $\pm 8\%$, интегральным - $\pm 5\%$. Ошибка измерения полного заряда пучка не более 5% для секционированного и интегрального цилиндров Фарадея. Исследовано распределение энергии по сечению импульсного электронного пучка ускорителя «Астра-М». Распределение энергии по сечению импульсного электронного пучка ускорителя «Астра-М» отличается для электронов с разной кинетической энергией. Наибольшая неоднородность плотности распределения энергии показана для электронов с энергией менее 85 кэВ.

Оглавление

Введение.....	15
Глава 1. Диагностика электронного пучка	19
1.1 Задачи диагностики.....	19
1.2 Генерация и поглощение пучка электронов.....	20
1.3 Глубина проникновения электронов.....	22
1.4 Теплопроводность и излучение	25
Глава 2. Методика определения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка и экспериментальное оборудование.....	27
2.1 Метод тепловизионной диагностики	27
2.2 Измерение заряда пучка цилиндром Фарадея.....	29
2.3 Методика измерения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка	32
2.4 Оборудование для проведения экспериментов.....	32
2.4.1 Импульсный ускоритель электронов «Астра-М».....	32
2.4.2 Используемое штатное диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов «Астра-М»	34
Глава 3. Разработка и испытание устройства для определения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка.....	36
3.1 Разработка и изготовление устройства для регистрации средней кинетической энергии в сечении пучка	36
3.1.1 Конструкция устройства.....	36
3.1.1.1 Общее устройство	36
3.1.1.2 Конструкция коллектора	39
3.1.1.3 Конструкция блока датчиков	42
3.1.1.4 Конструкция шунта цилиндра Фарадея.....	43
3.1.2 Используемая электроника	44
3.1.2.1 Бесконтактные температурные датчики	45
3.1.2.2 Контроллеры.....	47

3.1.3 Программное обеспечение	48
3.1.4 Сборка устройства.....	51
3.1.5 Калибровка температурных датчиков.....	52
3.2 Постановка эксперимента	54
3.3 Результаты.....	55
3.3.1 Оценка распределения энергии по сечению пучка.....	55
3.3.2 Определение спектра кинетических энергий электронов.....	58
3.3.3 Оценка распределения средней кинетической энергии электронов по сечению пучка	60
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	63
4.1 Предпроектный анализ	63
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	63
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	64
4.2 SWOT-анализ.....	66
4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации	69
4.4 Инициация проекта	71
4.4.1 Организационная структура проекта	72
4.5 План проекта.....	74
4.6 Разработка графика проведения НИОКР.....	75
4.7 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	77
4.7.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).....	77
4.7.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .	79
4.8 Основная заработная плата исполнителей темы	80
4.8.1 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	82
4.9 Отчисления во внебюджетные фонды	82
4.10 Накладные расходы.....	83

4.11 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	84
Глава 5. Социальная ответственность.....	89
Введение.....	89
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	90
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	90
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	91
5.2 Профессиональная социальная безопасность	93
5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	93
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	95
5.3 Радиационная безопасность	98
5.4 Электробезопасность	100
5.5 Пожарная и взрывная безопасность.....	102
Выводы по разделу.....	105
Заключение	107
Список публикаций.....	108
Список использованных источников	110
Приложение А	116
Приложение Б.....	134

Введение

Ускорители электронов прямого действия в настоящее время широко используются в качестве источников ионизирующего излучения в промышленности, медицине, для решения экологических задач взамен традиционным источникам на основе изотопов [1, 2, 3, 4]. Этому способствуют высокие показатели эффективности и безопасности технологических процессов с применением ускорителей. Уровень развития ускорителей непрерывного действия с энергией электронов порядка нескольких МэВ и высокой, сотни кВт мощностью, достиг промышленного применения [5, 6, 7]. Активно развиваются прикладные применения малогабаритных ускорителей импульсного действия [8].

Различные производственные процессы или исследования с применением электронных ускорителей требуют различной конфигурации и характеристик пучка. К основным характеристикам относятся: максимальная кинетическая энергия электронов, средняя кинетическая энергия электронов в пучке, энергия, перенесённая электронным пучком за импульс (для импульсных), импульсная мощность, средняя мощность электронного пучка и т.д. Оперативный контроль характеристик электронного пучка для ускорителей прямого действия, как правило, производится по выходным параметрам генератора – напряжению и току диода. Для практического использования, большую важность представляют характеристики пучка непосредственно в области его применения, как правило, в камерах с газовой средой при давлениях близких атмосферному. Таким образом, возникает необходимость измерения таких характеристик как: распределения энергии пучка в сечении, тока и заряда пучка, кинетической энергии электронов по сечению пучка, выведенного в атмосферу.

Для определения энергии переносимой пучком используются калориметры полного поглощения. Принцип измерения калориметром основан на использовании некоторого материала с известной теплоёмкостью

в качестве поглотителя пучка (коллектора, мишени) и дальнейшем расчете поглощенной энергии с учетом разности температур мишени до и после облучения. В работе [9] описан калориметр имеющий несколько теплоизолированных секторов, изменение температуры которых считывается термопарный датчиком. Такие калориметры не обладают высокой разрешающей способностью определения распределения энергии по сечению пучка, кроме того, термопара обладает высокой инерционностью, что вносит дополнительные погрешности в измерения. Работы [10, 11, 12] являются развитием одного метода – использования материала с низкой объемной плотностью и низкой теплопроводностью в качестве мишени для бомбардировки электронным пучком, измерения нагрева мишени тепловизором и дальнейшего расчета характеристик. Такие калориметры обладают высокой разрешающей способностью, недостатком такого метода является затрудненный анализ полученных данных, так как оценка распределения энергии по сечению пучка требует анализа пространственного отпечатка по всему объему материала. В исследовании [13] был предложен калориметр с секционированным коллектором, позволяющий достоверно определять распределение энергии по сечению пучка в течении 60 секунд после облучения. Квадратные секции коллектора и декартова система координат при описании результатов затрудняют использование прибора для пучков круглого сечения, а отсутствие автоматизации затрудняет обработку результата.

Для измерения тока и оценки заряда электронного пучка традиционно используется цилиндр Фарадея (ЦФ) [14]. Принцип действия заключается в следующем: электроны пучка полностью поглощаются в мишени (коллекторе цилиндра Фарадея), соединенной с заземлённым выводом генератора через низкоиндуктивный шунт с известным сопротивлением. Ток электронов обеспечивает падение напряжения на шунте, которое фиксируется с помощью осциллографа. Интеграл тока позволяет оценить заряд, перенесенный пучком электронов и, соответственно, их количество. На циклических и линейных

ускорителях с хорошей повторяемостью импульсов тока применяется конструкция цилиндра Фарадея сложной формы [15], включающая в себя массивный цилиндр - проводник, различные материалы поглотители, отражатели и др. Подобные ЦФ обладают высокой точностью, однако громоздки и неудобны в эксплуатации. Для импульсных частотных ускорителей может применяться конструкция, приведенная в [8], основными элементами которой являются плоский коллектор и низко индуктивный шунт. Подобные ЦФ позволяют достоверно регистрировать токи в пределах 400 А-100 кА [16].

Для экспериментального измерения спектра кинетических энергий электронов в ряде случаев используют метод отсечных фольг. В работе [17] на пути распространения пучка устанавливался ряд фольговых ЦФ, каждый из которых регистрировал количество электронов, поглощенных в конкретной фольге. Зная энергию электронов, необходимую для преодоления определённого материала, определённой толщины можно построить спектр электронов в пучке. Также известен метод тормозящего поля: электроны, обладающие поступательной энергией, достаточной для преодоления тормозящего электрического поля, создают ток мишени, по зависимости которого от тормозящего напряжения можно определить распределение электронов по энергии [18].

В данной работе предлагается создать устройство, совмещающее в себе функции калориметра и цилиндра Фарадея. Секционированный коллектор является развитием конструкции, описанной в [13]. Каждая секция коллектора теплоизолирована и служит для определения распределения энергии по сечению электронного пучка. Нагрев каждой секции измеряется с помощью отдельного бесконтактного температурного датчика, имеющего возможность автоматического получения и обработки показаний. В то же время, каждая секция коллектора соединяется электрически с низкоиндуктивным шунтом малого сопротивления, образуя коллектор ЦФ, позволяющий оценить общий ток и заряд пучка электронов. Применяя отсечные фольги, можно построить

спектр кинетических энергий электронов с помощью ЦФ, а принимая во внимание показания с секционированного калориметра, можно установить локализацию электронов с разной средней кинетической энергией по сечению пучка. Таким образом, данным прибором могут определяться важнейшие характеристики электронного пучка в одном и том же акте измерения, то есть отсутствует дополнительная погрешность, возникающая при смене диагностического оборудования и генерации условно разных пучков для измерений разных параметров.

Целью выпускной квалификационной работы является создание прибора для регистрации средней кинетической энергии электронов по сечению пучка и исследование распределения электронов с разной средней кинетической энергией по сечению пучка импульсного электронного ускорителя

Были поставлены следующие задачи:

- рассчитать основные параметры прибора, такие как: проективный пробег электронов в секциях коллектора, тепловые потери с поверхности ячеек за счет теплопроводности, излучения, конвекции, время уравнивания температуры на противоположных сторонах ячейки после облучения электронным пучком, сопротивление шунта ЦФ и необходимую рассеиваемую мощность резисторов ЦФ;
- разработать конструкцию устройства;
- изготовить, собрать и откалибровать прибор;
- исследовать распределение электронов с разной средней кинетической энергией по сечению пучка импульсного электронного ускорителя.

Глава 1. Диагностика электронного пучка

1.1 Задачи диагностики

В процессе эксплуатации количество и энергия частиц в реальном ускорителе в большей или меньшей степени может отличаться от расчетного, поэтому возникает необходимость постоянного контроля параметров пучка. Для обеспечения требуемого качества пучка производится коррекция параметров ускорителя по конечному эффекту — изменению измеряемых параметров пучка в нужную сторону. Такая коррекция может производиться как вручную, оператором, так и в автоматическом режиме с помощью различных систем обратной связи [12].

Ниже приведен далеко не полный список типичных задач ускорительной физики, так или иначе связанных с измерениями параметров пучка, достаточно условно разбитый на три этапа [12].

1. Ввод в эксплуатацию нового или модернизированного ускорителя.
2. Оперативное управление установкой в процессе регулярной работы.
3. Задачи ускорительной физики, необходимые для оптимизации работы установки.

Как отдельная немаловажная задача может рассматриваться контроль работоспособности и калибровка самих систем диагностики пучка, а также их исследование в процессе работы с целью улучшения точности, долговременной стабильности, надежности и т. д. [19].

Для измерения распределения энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении и энергии перенесенной пучком на мишень может быть использован калориметрический метод, основанный на использовании некоторого материала в качестве поглотителя энергии (мишени, коллектора) и дальнейший расчет поглощенной энергии с учетом разности температур мишени до и после облучения.

Использование контактного датчика цилиндра Фарадея позволяет измерить ток и заряд пучка электронов, измеряя падение напряжения на низкоиндуктивном шунте при протекании тока пучка.

Если на пути распространения пучка заряженных частиц установить материал с известными физическими характеристиками, можно посчитать минимальную кинетическую энергию исследуемых частиц, необходимую для преодоления этого барьера. Зная изначальное количество частиц в пучке и число частиц после прохождения барьера, можно построить энергетический спектр частиц пучка. Развитие данного метода представлено в данной работе.

1.2 Генерация и поглощение пучка электронов

Под действием ускоряющего напряжения U_B в электрическом поле источника электронов последние ускоряются до скорости V_e (рис. 1.1).

У технологических электронно-лучевых установок ускоряющие напряжения обычно лежат в пределах 10-150 кВ [20]. Для химических электронно-лучевых процессов чаще требуются ускоряющие напряжения около 300 кВ, реже - 1 МВ и выше. В диапазоне энергий 10-150 кВ скорость электронов составляет 0,2-0,6 скорости света. Релятивистские эффекты следует учитывать при ускоряющих напряжениях свыше 100 кВ. При ускорении до V_e в электростатическом поле электрон приобретает кинетическую энергию:

$$E = \frac{m_{e0}}{2} V_e^2 \left(1 + \frac{3}{4} \frac{V_e^2}{c^2} + \frac{5}{8} \frac{V_e^4}{c^4} + \dots \right) = eU_B \quad (1.1)$$

где m_{e0} - масса покоя электрона; e - его заряд; c - скорость света.

В зоне встречи пучка с объектом (зоне действия пучка) он бомбардирует объект; кинетическая энергия электронов при взаимодействиях с атомами превращается в тепловую энергию или в энергию возбуждения атомов и молекул. Часть электронов пучка отражается и рассеивается поверхностью объекта, а в результате вторичных процессов возникают

вторичные электроны, рентгеновское излучение и во многих случаях - тепловые электроны. Возникающее тепло повышает температуру в зоне действия пучка, и появляются потоки от места преобразования энергии в окружающую среду, в том числе поток теплового излучения от нагретой поверхности объекта (рис. 1.2) [20].

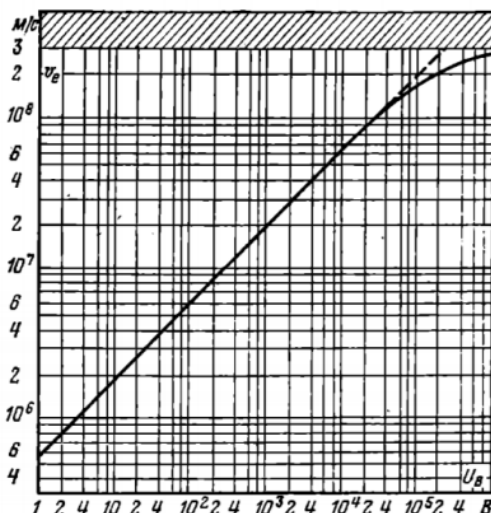


Рисунок 1.1 - Скорость V_e электронов, прошедших электрическое поле с ускоряющим напряжением U_B [20]. Заштрихована область скорости света.

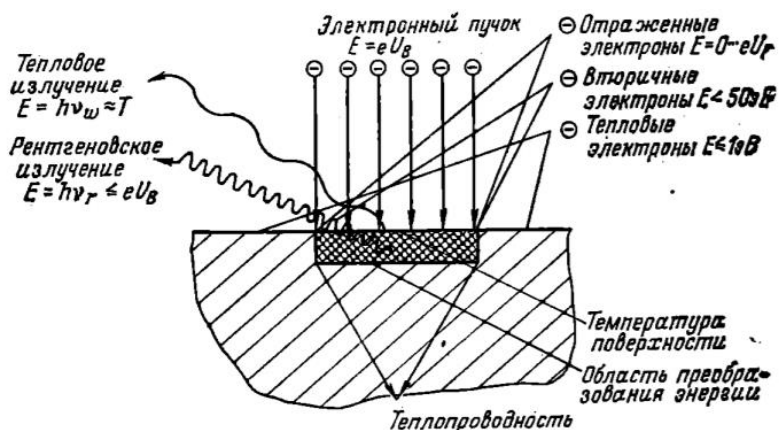


Рисунок 1.2 - Явления при бомбардировке объекта электронным пучком [20].

Возникающее в зоне действия пучка тепло, а также возбуждение им атомов и молекул лежат в основе всех способов электронно-лучевой технологии. Теплоотвод излучением же является основным процессом, который используется в тепловизионной диагностике параметров электронного пучка, которая является одним из типов калориметрической диагностики.

1.3 Глубина проникновения электронов

Для реализации методов калориметрической диагностики, а также диагностики с помощью цилиндра Фарадея пучка необходимо, чтобы все электроны поглотились в толще материала.

Проникая при бомбардировке мишени внутрь её материала, электроны пучка испытывают многочисленные упругие и неупругие столкновения с атомами и молекулами вещества, отдавая им свою энергию и отклоняясь от своего первоначального направления. Обладая массой, гораздо меньшей, чем атом или молекула, электрон при каждом столкновении отдает им очень малую долю своей энергии. Поэтому для того, чтобы электрон отдал частицам мишени всю свою энергию, требуется очень большое число столкновений [21].

За глубину проникновения S электронов пучка принимают расстояние по нормали от поверхности мишени в глубь нее, на котором электроны теряют практически всю свою энергию. Она зависит от энергии электронов и плотности материала (рис. 1.3). Вследствие зависимости вероятности столкновений энергии электронов для различных интервалов энергии получаются разные аналитические выражения. С приближением, достаточным для целей электронно-лучевой технологии, эти зависимости имеют вид [22]:

$$S \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{U_B^{5/3}}{\rho} (100 \text{ кэВ} \leq eU_B \leq 1 \text{ МэВ}), \quad (1.2)$$

где S - глубина проникновения, см; U_B - ускоряющее электроны напряжение, В; ρ - плотность материала, г/см³.

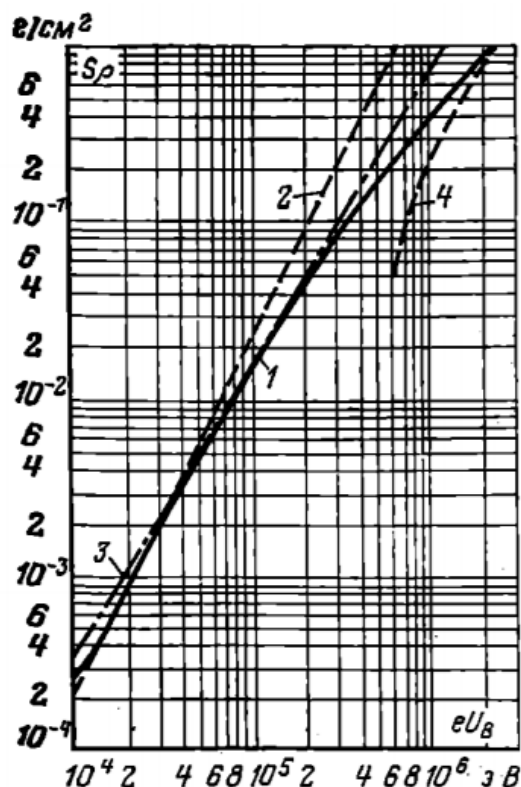


Рисунок 1.3 - Произведение глубины проникновения электронов S на плотность материала мишени ρ в зависимости от энергии электронов eU_B . 1 - измерения [22]; 2 - приближение по уравнению (1.2); 3 - приближение по уравнению (1.3); 4 - приближение по уравнению (1.4) [23].

Например, для стали ($\rho=7,8$ г/см³) при $U_B=10$ кВ $S=0,27$ мкм, а при 100 кВ $S=27,0$ мкм. Следовательно, энергия электронного пучка преобразуется в тепло внутри очень тонкого поверхностного слоя мишени.

Таблица 1.1 - Проективные пробеги электронов (в см) в различных веществах в зависимости от их энергии [24]

Вещество	Энергия электронов, МэВ				
	0,05	0,5	5	50	500
Воздух	4,1	160	$2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
Вода	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,19	2,6	19	78

Продолжение таблицы 1.1

Алюминий	$2 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,95	4,3	8,6
Свинец	$5 \cdot 10^{-4}$	0,026	0,30	1,25	2,5

Передача энергии по мере проникновения электрона вглубь вещества происходит неравномерно [24, 24]. Поэтому мощность, поглощаемая в единице объема вещества, является функцией расстояния от поверхности. Как показывает рис. 1.4, эта функция в широких пределах не зависит от энергии электронов в пучке; её можно приближенно описать выражением [19]:

$$\frac{p_A(z)}{p_{Amax}} = 1 - \frac{9}{4} \left(\frac{z}{S} - \frac{1}{3} \right)^2, \quad (1.3)$$

здесь $p_A(z)$ - удельная объемная мощность, поглощаемая материалом мишени, в зависимости от расстояния z от ее поверхности; $p_{Amax}(z) = 4/3 \cdot \eta_A \cdot U_B \cdot j$ - максимальное значение p_A на расстоянии $z=S/3$ от поверхности мишени; S - глубина проникновения электронов; j - плотность тока пучка в месте его встречи с поверхностью мишени; η_A - доля поглощенной мощности от поступающей на поверхность мишени мощности пучка.

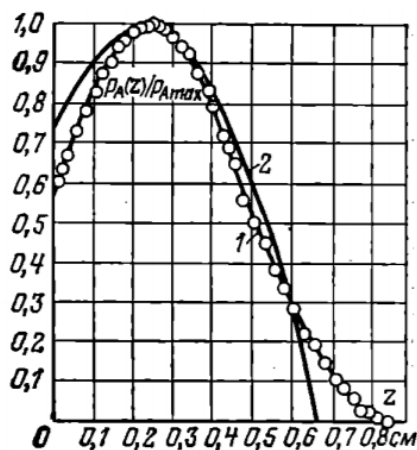


Рисунок 1.4 - Зависимость удельной объемной мощности p_A поглощаемой материалом мишени, приведенная к ее максимальному значению p_{Amax} , от глубины z под поверхностью мишени.

Материал - полиэтилен ($\rho = 0,94 \text{ г/см}^3$), $eU_B = 1,5 \text{ МэВ}$; 1 - измерения;

2 - приближение по уравнению (1.5) [24].

Характерно, что на расстоянии от поверхности, равном $1/3$ глубины проникновения электронов, поглощаемая мощность достигает максимума и затем спадает до нуля на расстоянии, равном глубине проникновения. Для тепловизионной диагностики такая неравномерность поглощения энергии не играет роли, так как вызываемая ею в пределах глубины проникновения разность температур быстро выравнивается под действием теплопроводности. Для различных нетермических процессов, у которых желаемый технологический эффект непосредственно связан с энергией, поглощаемой в единице объема, ее зависимость от глубины, наоборот, может оказать существенное влияние на выбор способа осуществления процесса.

Если диаметр электронного пучка, бомбардирующего объект, мал по сравнению с глубиной проникновения электронов, то наряду с зависимостью удельной объемной энергии от глубины появляется еще и ее зависимость от радиуса. Из-за рассеяния электронов, связанного с процессами их столкновений, объем, в котором происходит преобразование энергии, оказывается большим, чем объем, определяемый диаметром пятна пучка на поверхности объекта и глубиной проникновения электронов. Отсюда вытекает, что сделать размеры зоны, непосредственно обрабатываемой электронным пучком, произвольно малыми путем уменьшения диаметра пучка - невозможно [25].

1.4 Теплопроводность и излучение

В термических процессах калориметрической диагностики в общем случае решающую роль играет энергия электронного пучка, преобразуемая в ходе описанных выше взаимодействий в тепло. Потери тепла происходят за счет теплопроводности и излучения (см. рис. 1.2). В зависимости от плотности мощности те или другие потери могут быть преобладающими. Например, при калориметрической диагностике пучка с малой плотностью мощности потерями на излучение можно пренебречь и считать, что потери тепла

определяются только теплопроводностью. При диагностике пучков с высокими плотностями мощности, потери тепла излучением могут значительно превысить потери теплопроводностью. В последнем случае теплопроводность и излучение могут решающим образом повлиять на тепловой КПД всего процесса [26].

Глава 2. Методика определения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка и экспериментальное оборудование

В данной работе кинетическая энергия электронов в сечении пучка измеряется по методу отсечных фольг. Однако разработанный прибор позволяет дополнительно измерять такие характеристики как распределение энергии по сечению пучка, полный заряд пучка. Исходя из этого в данной главе, помимо прочего, описаны такие аспекты как основы тепловизионной диагностики, применяемой в измерениях с помощью бесконтактных датчиков температуры, а также принципы измерения заряда с помощью цилиндра Фарадея.

2.1 Метод тепловизионной диагностики

Основной принцип метода тепловизионной диагностики распределения энергии импульсного электронного пучка является использование некоторого материала с известной теплоёмкостью в качестве поглотителя тепла (мишени, коллектора) и дальнейший расчет поглощенной энергии с учетом разности температур мишени до и после облучения. Необходимыми условиями метода являются:

- 1) Толщина мишени должна быть больше, чем проективный пробег электронов с заданной энергией в данном веществе;
- 2) Снятие показаний производится после установления теплового равновесия на обеих сторонах мишени;
- 3) Конвективная теплоотдача пренебрежимо мала;
- 4) Нет термической абляции.

Для расчёта данного метода мишень может быть рассмотрена как совокупность элементарных калориметров с координатами $U(x, y)$ можно рассчитать по следующей формуле [27]:

$$U(x, y) = C_v \cdot d \cdot \rho \cdot \Delta T(x, y), \quad (2.1)$$

где C_v - удельная теплоемкость материала мишени, d - толщина мишени, ρ - плотность мишени, $\Delta T(x, y)$ - изменение температуры до и после облучения. В эксперименте $U(x, y)$ определялось по термограммам мишени [27].

Из уравнения (2.1), можно сделать вывод, что при той же плотности энергии пучка, более толстая мишень обеспечивает меньший нагрев, что может быть неприемлемо при регистрации данных. Поэтому материал и толщина должны выбираться таким образом, чтобы получить приемлемую точность при снятии показаний. Большой проективный пробег электронов по сравнению с ионами ведет к меньшей плотности распределения энергии в мишени, что делает возможность термической абляции, которая ограничивает применение данного метода, крайне низкой [27]. Однако более низкая плотность мощности может привести к значительному боковому теплообмену. Это приведет к увеличению ошибки в расчетах.

Распределение плотности мощности на мишени может быть записано в виде [27]:

$$P(x, y, z, t) = d(z) \cdot U(x, y) \cdot g(t), \quad (2.2)$$

где $P(x, y, z, t)$ – распределение плотности мощности пучка на мишени, $d(z)$ – нормированное по глубине распределение потери энергии пучка, $U(x, y)$ – поверхностное распределение энергии пучка на мишени, $g(t)$ – нормированное по времени изменение мощности пучка.

Температура T в момент времени t и позиции (x, y, z) может быть вычислена путем решения уравнения теплопроводности Фурье. Дифференциальное уравнение задается как [27]:

$$\rho \cdot C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + P \quad (2.3)$$

где ρ – плотность мишени, C_v - удельная теплоемкость материала мишени, λ - теплопроводность мишени.

В качестве начальных условий принимаются:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2.4)$$

где T_0 – начальная температура мишени.

Чтобы оценить потери энергии на излучение, в качестве граничных условий принимаются граничные условия Стефана-Больцмана:

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (2.5)$$

где j – поток энергии излучаемой мишенью в окружающую среду, σ – константа Стефана-Больцмана, ε – излучательная способность мишени [27].

2.2 Измерение заряда пучка цилиндром Фарадея

Цилиндр Фарадея (Faraday cup) — один из старейших, но до сих пор используемых датчиков интенсивности пучка, основным достоинством которого является высокая точность измерения заряда. В простейшем виде цилиндр Фарадея представляет собой массивный, электрически изолированный электрод, стоящий на пути пучка заряженных частиц — электронов, протонов или ионов [14]. Когда пучок частиц поглощается материалом электрода, цилиндр Фарадея оказывается электрически заряженным. К электроду с помощью подводящего провода подключается сопротивление, замыкающее цепь на землю. Таким образом, цилиндр Фарадея является частью замкнутой электрической цепи, состоящей из двух частей — вакуумной, в которой носителями заряда являются частицы пучка, и твердотельной, где носителями заряда являются электроны проводимости. При отсутствии потерь заряда электрический ток в проводнике эквивалентен току пучка в вакууме. Ток в проводнике измеряется прецизионным амперметром, включенным непосредственно в цепь, или вольтметром, измеряющим падение напряжения на сопротивлении, замыкающем цепь на землю.

Конструкция цилиндра Фарадея определяется требованиями конкретной физической задачи и может быть достаточно сложной, особенно для измерения интенсивности коротких сгустков или пучков

высокоэнергичных частиц. Расчет цилиндра Фарадея проводится с учетом требуемой точности измерения. Главным критерием является допустимая утечка заряда за счет проницаемости цилиндра Фарадея для частиц пучка. Для минимизации утечки в конструкции обычно используют комбинацию легкого (графит, алюминий) и тяжелого (медь, свинец) материалов.

В погрешность измерений вносит вклад утечка отраженных частиц пучка через входной канал. Коэффициент отражения δ_r частиц с энергией E МэВ для мишени толщиной x из материала с атомным номером Z можно определить с помощью эмпирической зависимости [28]:

$$\delta_r = \delta_\infty \left(1 - e^{-4x^2/x_{1/2}^2}\right), \quad (2.6)$$

где δ_∞ — предельный коэффициент отражения для бесконечно толстого слоя.

$$\delta_\infty = 0.0343 \left[\left(\frac{Z^3}{E}\right) - 1 \right], \quad (2.7)$$

где $x_{1/2}$ — толщина материала, при которой коэффициент пропускания частиц пучка равен 1/2.

Для уменьшения отражения частиц пучка дно цилиндра изготавливают из материала с низким атомным номером (графит, алюминий, сталь), которые имеют малое сечение отражения, в передней части цилиндра делают входной канал, уменьшающий телесный угол отражения.

Поглощение частиц возможно сделать практически 100 %-м, увеличивая размеры цилиндра. На практике обычно находят компромисс так, чтобы утечка заряда оставалась в допустимых пределах при разумных размерах и массе цилиндра.

Необходимо учитывать, что при низких кинетических энергиях пучка преобладают потери энергии на ионизацию, а при высоких — радиационные потери. Поэтому для низких энергий цилиндры Фарадея изготавливают из материала с низким атомным номером, а толщина цилиндра выбирается из условия полного поглощения частиц с заданной энергией. Для высоких энергий цилиндр делается из материала с большим атомным номером, лишь

дно цилиндра покрывают легким материалом для уменьшения отражения. Другими факторами, влияющими на точность измерения, являются: утечка вторично-эмиссионных электронов через входной канал, ток ионов и электронов, появляющихся вблизи цилиндра при ионизации воздуха, а также паразитные утечки тока на землю. Для предотвращения утечки вторично-эмиссионных электронов обычно используется напряжение смещения, приложенное к цилиндру Фарадея или к отражательной сетке, помещенной перед ним, а также магнитное поле. Для уменьшения тока, обусловленного ионами или электронами, цилиндр Фарадея помещают в вакуумную камеру. Меры по уменьшению тока утечки на землю сводятся к обеспечению хорошей изоляции цилиндра и вывода, идущего к измерительной схеме, а также к поддержанию потенциала цилиндра близким к потенциалу земли.

Более точные расчеты, необходимые при разработке конструкции цилиндра Фарадея, проводятся с помощью компьютерного моделирования [28], использующего метод Монте-Карло, весьма эффективный в расчетах взаимодействия частиц с веществом. Цилиндр Фарадея может применяться для абсолютных измерений заряда пучка в довольно широком диапазоне энергии частиц.

Цилиндр Фарадея обычно используется в качестве первичного эталонного прибора для калибровки измерителей интенсивности, не разрушающих пучок, таких как датчики тока пучка (wall current monitor, WCM) [29]. С помощью цилиндра Фарадея также с достаточно высокой точностью измеряют большие импульсные токи пучка, при этом рассеиваемая мощность достигает сотни киловатт, и прибор должен быть оборудован системой водяного охлаждения [30].

В данной работе использовался цилиндр Фарадея упрощенной конструкции, подобный описанному в [8] и [16], ошибка измерения вычислялись статистическим путем в пределах серии измерений.

2.3 Методика измерения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка

Как было сказано выше, для измерения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка разработанным прибором необходимо иметь данные по распределению энергии по сечению пучка, измеряемому секционированным калориметром, и спектру кинетических энергий, который может быть определён с помощью цилиндра Фарадея и отсечных фольг. По результатам измерения данных характеристик возможно построить диаграммы распределения электронов с разной кинетической энергией по сечению пучка и вносимый ими энергетический вклад.

2.4 Оборудование для проведения экспериментов

2.4.1 Импульсный ускоритель электронов «Астра-М»

В экспериментах по разработке и испытанию устройства для регистрации средней кинетической энергии по сечению электронного пучка применялся импульсный ускоритель электронов «Астра-М», рассмотренный в [19].



Рисунок 2.1 - Внешний вид ускорителя «Астра-М» [19].

Ускоритель электронов «Астра-М» представляет собой комплекс модульных электрических устройств в единой станине, предназначенный для обработки изделий с использованием импульсного ионизирующего излучения.

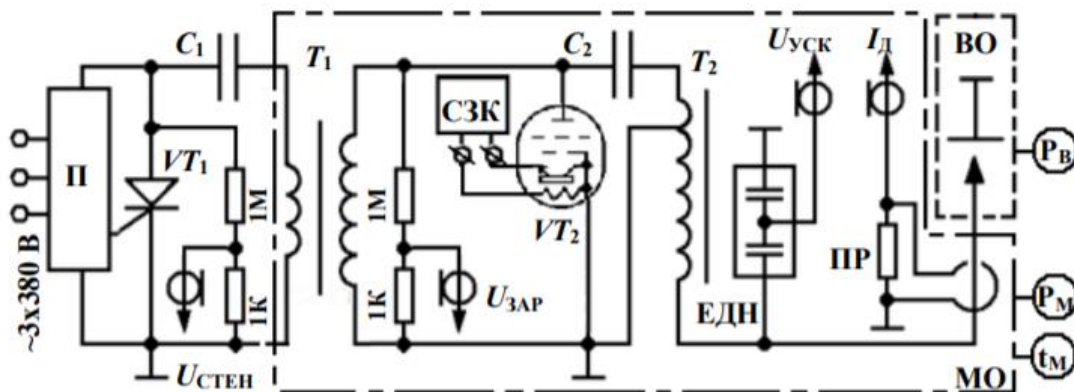


Рисунок 2.2 - Схема расположения диагностического оборудования ускорителя. П - преобразователь напряжения; ГИ - генератор импульсов; C1 - первичный накопитель; VT1 - тиристорный коммутатор; T1 - повышающий импульсный трансформатор; C2 - высоковольтный накопитель; VT2 - коммутатор; T2 - высоковольтный импульсный трансформатор; К-А - ускоряющий промежуток; T3 - импульсный трансформатор тока; C3 - конденсатор; VT3 - маломощный импульсный тиратрон с термокатодом; T4 - пиктрансформатор; R1 - варистор; ИНН - источник накальных напряжений; VD1, VD2, VD1 - диоды, СЗК - система запуска коммутатора; ЕДН - ёмкостный делитель напряжения; ПР - пояс Роговского; ВО - вакуумный объём; МО - объём с трансформаторным маслом; РВ - датчик давления вакуума; РМ - датчик давления масла; tМ - датчик температуры масла. Сопротивление резисторов в Ом [8]

Генератор ускорителя формирует импульсы напряжения амплитудой до 260 кВ, током пучка до 1 кА, длительностью до 300 нс и частотой повторения до 40 импульсов в секунду [8].

2.4.2 Используемое штатное диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов «Астра-М»

Для измерения значений ускоряющего напряжения субмикросекундной длительности применяли ёмкостный делитель напряжения, конструкция которого схематично показана на рисунке 2.3 [31].

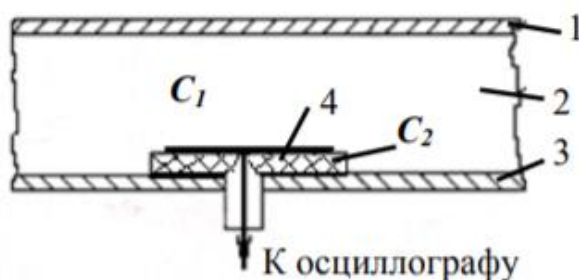


Рисунок 2.3 - Конструктивное исполнение ёмкостного делителя напряжения. C_1 — ёмкость высоковольтного плеча; C_2 — ёмкость низковольтного плеча; 1 - высоковольтный электрод; 2 - трансформаторное масло; 3 - заземлённый корпус; 4 - двусторонний фольгированный текстолит [8].

Регистрацию выходного тока генератора, полного тока диода, производили посредством применения трансформатора тока - пояса Роговского (ПР) с обратным витком. Наличие обратного витка позволяет снизить влияние внешних магнитных полей. Параметры пояса Роговского соответствуют рекомендациям для регистрации субмикросекундных токов, приведёнными в [32]. Постоянная времени ПР $\tau_{\text{пр}} \approx 5$ мкс, что обеспечивает работу пояса в режиме трансформации тока.

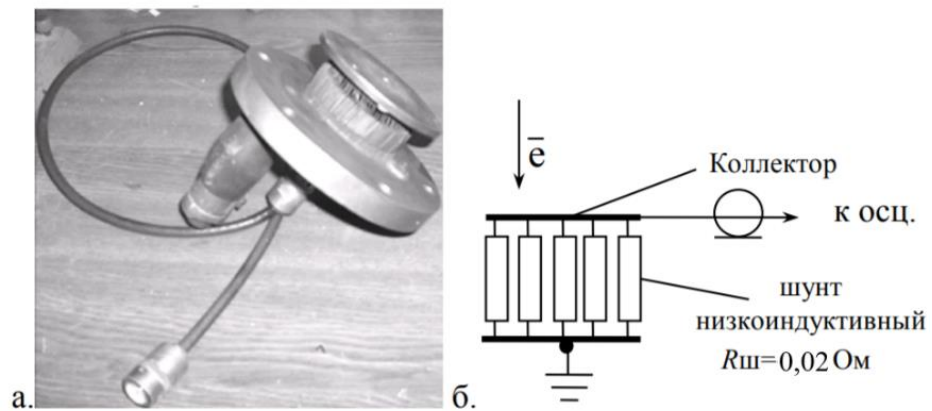


Рисунок 2.4 - Рисунок 20. Внешний вид (а) и схематичное устройство (б) цилиндра Фарадея [8].

Измерение тока пучка электронов, прошедших за плоскость анода, производилось с помощью шунта обратного тока - цилиндра Фарадея, схема и внешний вид которого приведены на рисунке 20. Применяемая конструкция ЦФ подробно описана в литературе [16] и позволяет достоверно регистрировать токи в пределах 400 А-100 кА [33].

Калориметр полного поглощения использовался для оценки энергии, переносимой электронным пучком за анод вакуумного электронного диода. Калориметр имеет конструкцию, подробно описанную в [9]. Коллектор калориметра выполнен тем же диаметром, что и коллектор ЦФ и представляет собой медный диск известной массы. К коллектору калориметра с помощью сплава Вуда [34] припаян датчик температуры, показания которого передаются на выносной блок индикации. Толщина диска выбиралась исходя из условий максимального проективного пробега электронов с энергиями ≤ 500 кэВ минимальной тепловой инерции прибора.

Для регистрации показаний с делителя напряжения, ПР, интегрального и секционированного ЦФ использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS2024B, входящий в государственный реестр средств измерения [35].

Глава 3. Разработка и испытание устройства для определения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка

Глава 3 посвящена изготовлению, калибровке и испытанию устройства для определения средней кинетической энергии электронов в сечении пучка и сравнению полученных характеристик с измерениями контрольных интегральных калориметра и цилиндра Фарадея. Испытания приводились в несколько этапов: непосредственное облучение коллектора устройств и с использованием дополнительных отсечных алюминиевых фольг толщиной 50 мкм, 100 мкм и 150 мкм.

3.1 Разработка и изготовление устройства для регистрации средней кинетической энергии в сечении пучка

3.1.1 Конструкция устройства

Устройство было разработано для измерения параметров импульсных электронных пучков (до 500 кэВ, 0.2-10 кА, 50-100 см², 0.05-10 Дж/см²) научно-исследовательской лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий" Томского политехнического университета. Особое внимание при разработке конструкции устройства было уделено возможности использования прибора при измерениях характеристик пучков, выведенных в атмосферу.

3.1.1.1 Общее устройство

Схематично схема измерения устройством показана на рисунке 3.1. Крепежный фланец (7) устанавливается с наружной части выводного окна (1) ускорителя (4). В крепежный фланец монтируется сборка устройства, главными элементами которого являются коллектор (5) с медными секциями

(2), блок с бесконтактными температурными датчиками (6), шунт цилиндра Фарадея (11). Корпус коллектора выполнен из пластика и защищен от разрушающего действия электронного пучка экраном (3), изолированным от секций. Каждая секция коллектора соединяется с шунтом ЦФ по проводу МГТФ-0.12 (8). С шунта ЦФ сигнал передается по коаксиальному кабелю (13) на осциллограф (17). Температурные датчики управляются контроллерами (15) и соединяются с помощью джамп-кабелей (10). Управление системой измерения температуры осуществляется с компьютера (14), подключенного к контроллерам по кабелю USB (16).

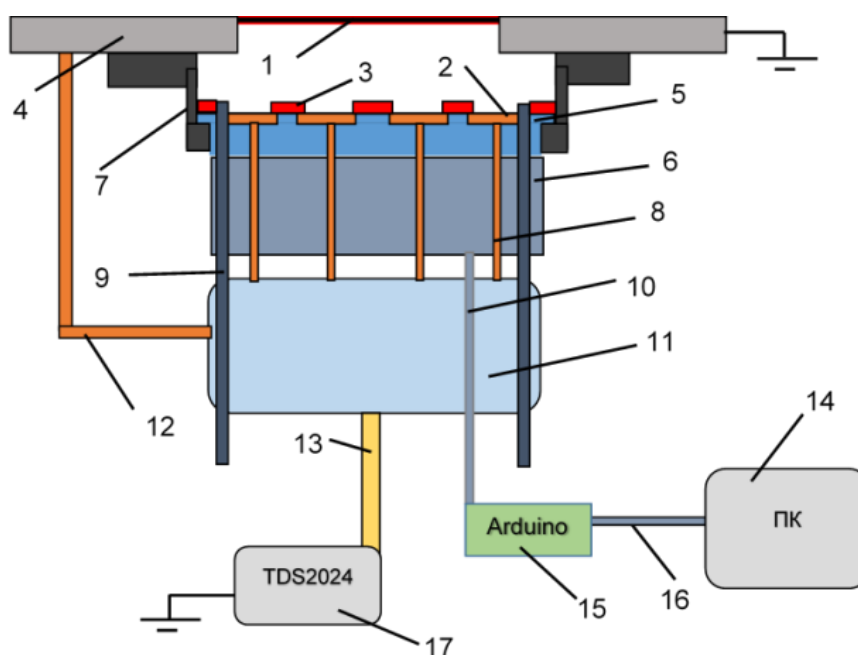


Рисунок 3.1 – Схема измерения устройством для регистрации средней кинетической энергии электронов при атмосферном давлении: 1 – выводное окно ускорителя; 2 – медная секция; 3- защитный экран; 4 – корпус ускорителя; 5 – коллектор; 6 – блок температурных датчиков; 7 – крепежный фланец; 8 – токопровод; 9 – крепежная шпилька; 10 – джамп-провода; 11 – шунт ЦФ; 12 – заземление шунта ЦФ; 13 – коаксиальный кабель; 14 – персональный компьютер; 15 – блок контроллеров; 16 – USB кабель; 17 – осциллограф.

Размеры секций и коллектора устройства был выбран на основе знаний о конфигурации пучка ускорителя «ТЭУ-500» (500 кэВ, 0.55 Дж/см² на импульс, 60 нс на полувысоте) [36]. 3D модель устройства без коммутационных проводов и датчиков можно увидеть на рисунке 3.2.

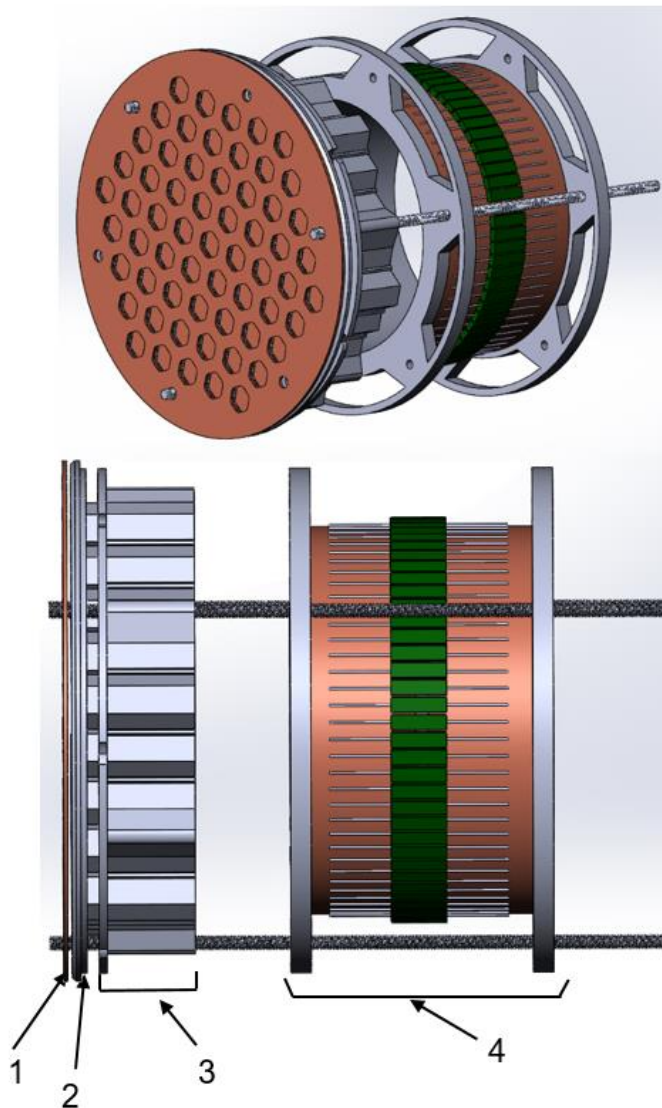


Рисунок 3.2 – Внешний основных узлов устройства: 1 – защитный экран; 2 – коллектор с матрицей секций; 3- корпус блока температурных датчиков; 4 – шунт ЦФ.

Форма и размеры основных узлов позволяют размещать устройство в цилиндрических камерах диаметром от 125 мм и длиной от 30 см. Коллектор, корпус блока датчиков и шунт ЦФ имеют сложную конструкцию, которая будет подробно описана ниже.

3.1.1.2 Конструкция коллектора

Как было сказано выше, основной идеей при проектировании устройства служило создание конструкции коллектора в виде матрицы чувствительных элементов (секций), с которых должны сниматься показания, и при этом надежно теплоизолированных друг от друга. Таким образом, была предложена конструкция, изображенная на рисунке 3.3.

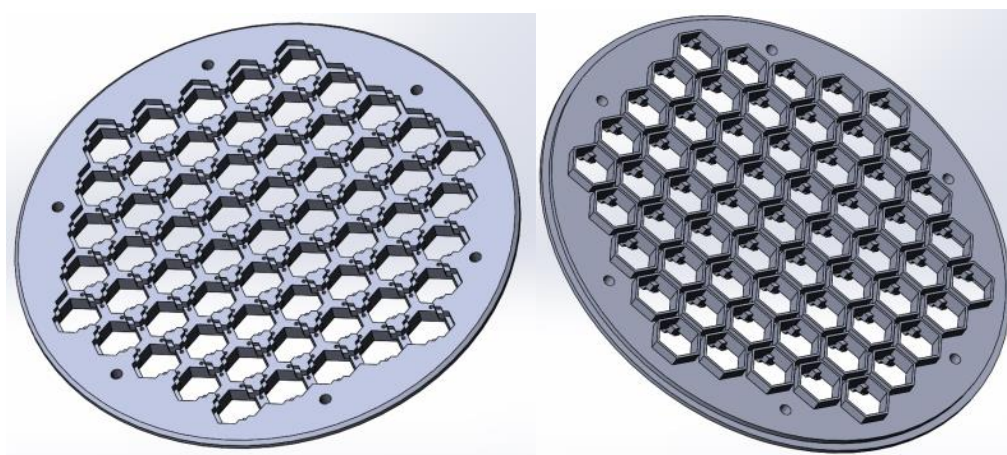


Рисунок 3.3 – Внешний вид коллектора устройства без медных секций

Коллектор имеет форму диска диаметром 129 мм и толщиной 6,7 мм. Конструкция предусматривает возможность пайки каждой из 61 секции с торцевой части. На обратной стороне коллектора спроектированы специальные пазы для разводки проводов одинаковой длины от каждой секции до шунта ЦФ.

Шестигранные секции имеют диаметр вписанной окружности 10,5 мм и толщиной 0,5 мм. И Суммарная площадь секций составляет около 29% от общей площади коллектора, что можно использовать при расчетах суммарной энергии и заряда переданным коллектору при облучении пучком. Стоит отметить особую конструкцию крепления секций, обеспечивающую надежную фиксацию секции в корпусе коллектора с наименьшей площадью соприкосновения (рисунок 3.4).

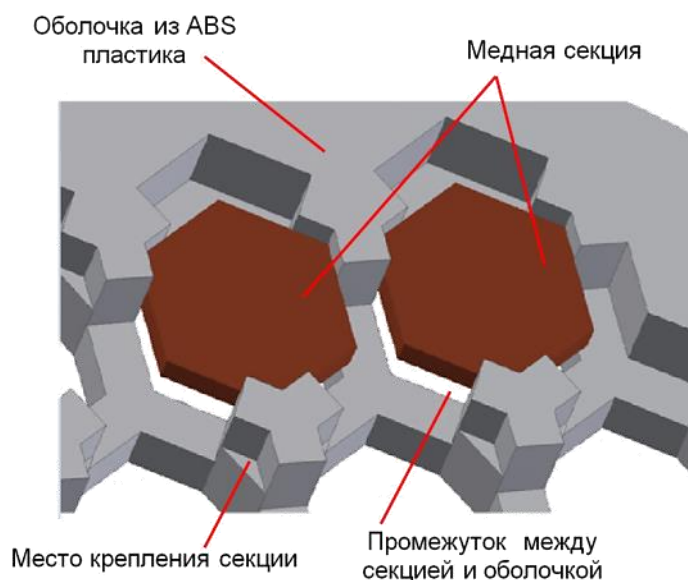


Рисунок 3.4 – Крепление секций

В качестве материала для коллектора был выбран ABS-пластик. Данный материал удобен в обработке (возможность 3D-печати) и обладает необходимыми свойствами, такими, как низкие коэффициенты теплопроводности и теплоемкости (см. Приложение Б).

В качестве материала для изготовления секций, выбрана медь сплав М1, который имеет высокий коэффициент теплопроводности и относительно низкий коэффициент теплоёмкости (см. Приложение Б). Это необходимо для уменьшения внутренних градиентов температуры (разницы температур в разных точках). Сравнительно высокий порог абляции меди при достаточных механических свойствах сплава М1, делает её предпочтительным материалом для создания калориметра.

Также, сторона ячеек, с которой снимались показания температуры, была окрашена матовым акриловым покрытием для увеличения коэффициента излучения материала.

С целью проверки конструкции, предложенной выше, были рассчитаны такие характеристики, как максимальный проективный пробег электронов в секциях коллектора, тепловые потери с поверхности секций за счет теплопроводности, излучения, конвекции, время уравнивания

температуры на противоположных сторонах ячейки после облучения электронным пучком.

Для того чтобы все электроны полностью отдали энергию в секции, и, следовательно, максимально ее нагрели, необходимо чтобы электронный пучок был поглощен в толще секции. Таким образом, встает вопрос о глубине проникновения электронов в меди. Для электронов проективный пробег определяется минимальной толщиной вещества, измеряемой в направлении исходной скорости пучка и соответствующей полному поглощению электронов. Численное значение можно рассчитать с помощью формулы:

$$S \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{U_B^{5/3}}{\rho},$$

где $U_B = 260$ кВ - ускоряющее электроны напряжение; $\rho = 8,96$ г/см³ - плотность меди.

Получаем $S \approx 0,01$ см - проективный пробег электронов с энергией $E \leq 1$ МэВ в меди.

Чтобы учесть тепловые потери энергии на излучение с обеих сторон ячейки, преобразовав формулу можно использовать формулу Стефана-Больцмана:

$$j = \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2),$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана $\varepsilon_1 = 0,9$ - излучательная способность на задней стороне мишени; $\varepsilon_2 = 0,3$ - излучательная способность на лицевой стороне мишени; T – температура мишени после облучения; T_0 – температура мишени до облучения.

С учетом вышеперечисленного потери энергии на излучение при разнице температур 10 °С будут составлять порядка 10⁻⁴ % от энергии передаваемой электронным пучком всей поверхности коллектора.

Оценки тепловых потерь на конвективный теплообмен и теплопроводность были оценены в ходе экспериментов.

В предыдущих работах [13] мы уже оценивали время установления теплового равновесия в медной секции толщиной 1 мм после облучения электронным пучком с помощью программы Elcut 6.2. Были получены результаты, представленные на рисунке 3.5.

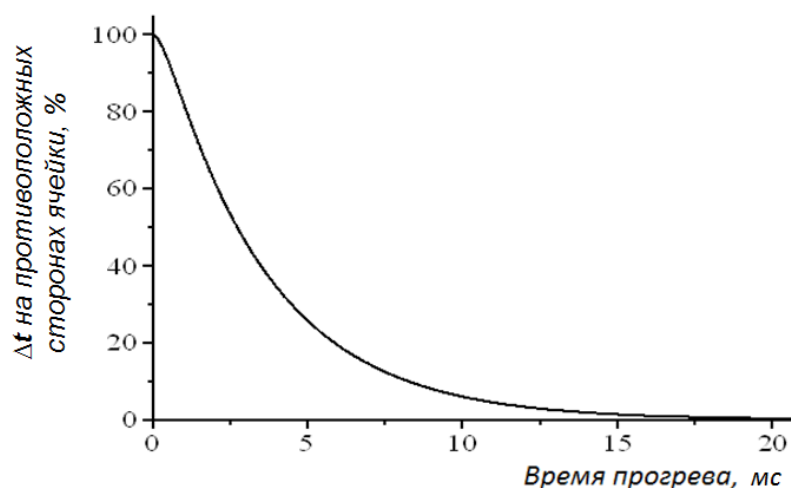


Рисунок 3.5 – Разность температур на сторонах секции в зависимости от времени прогрева [13]

Анализ результатов моделирования выявил, что разность температур между сторонами секции составит менее 1% уже через 15 мс. Так как в данной итерации устройства используется секция меньшей толщины, распространение тепла между лицевой и задней гранями секции будет происходить быстрее, а проведение измерения лежит в более позднем промежутке времени.

3.1.1.3 Конструкция блока датчиков

Конструкция корпуса блока датчиков проектировалась в соответствие с формой матрицы секций, размерами коллектора, а также габаритами самих датчиков. Внешний вид блока датчиков без соединительных проводов показан на рисунке 3.6.

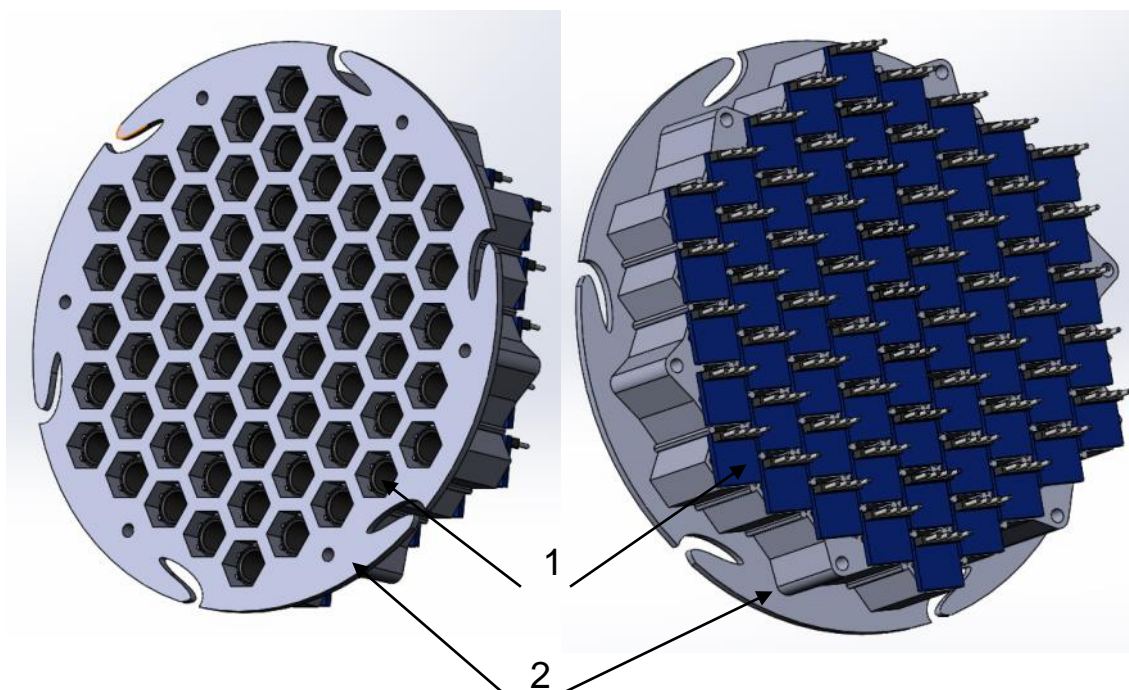


Рисунок 3.6 – Внешний вид блока датчиков: 1 – датчики MLX90614ESF-DCI;
2 – корпус

ABS – пластик использовался в качестве материала для корпуса, как и в случае с коллектором. Приведенная конструкция обеспечивает термо- и электроизоляцию датчиков друг от друга.

3.1.1.4 Конструкция шунта цилиндра Фарадея

Конструкция шунта ЦФ представлена на рисунке 3.7. Корпус также выполнен из ABS-пластика. Разность потенциалов на шунте снимается с двух медных шин: потенциальной шины (1) и заземляющей шины (3), соединённых резисторами ТВО-3Е0С099 [38], сопротивлением 3 Ом и рассеиваемой мощностью 0,25 Вт и сопротивлением 3 Ом (2). Резисторы подключаются параллельно в количестве 200 штук. Суммарное сопротивление шунта ЦФ составляет 16 мОм.

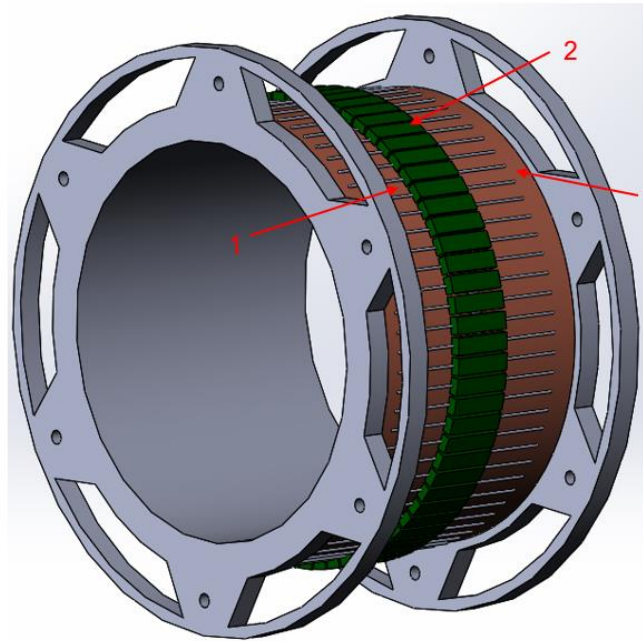


Рисунок 3.7 – Внешний вид шунта ЦФ: 1 – потенциальная шина; 2 – резисторы ТВО; 3 – заземляющая шина.

Выбор резисторов обоснован знаниями о характеристиках пучка «ТЭУ-500» (энергия в импульсе 50 Дж) [36].

Значения падения напряжения на ЦФ снимаются с помощью коаксиального кабеля РК-75-4-11 [39].

3.1.2 Используемая электроника

Как было указано выше непосредственными компонентами устройства служили бесконтактные температурные датчики MLX90614ESF-DCI [40] в количестве 61 штуки и контроллеры ATmega328 на платформе Arduino Nano [41] в количестве 4 штук. Связь между контроллерами и датчиками осуществляется по протоколу I2C. Связь между контроллерами и ПК устанавливается по USB. Дополнительное питание не требуется.

3.1.2.1 Бесконтактные температурные датчики

Внешний вид температурных датчиков MXL90614ESF-DCI компании Melexis [40] на базе платы GY-906 показан на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Внешний вид датчика MXL90614ESF-DCI [40]

Программирование датчиков осуществляется с помощью уже упомянутых контроллеров ATmega328 в программе Arduino IDE.

Преимуществами подобных датчиков являются относительно простая автоматизация, компактность, хорошая точность в условиях бесконтактного измерения.

Таблица 3.1 – Основные характеристики датчика MXL90614ESF-DCI [40]

Параметр	Величина
Напряжение питания, В	3
Диапазон измерений, °C	-40 - 85
Количество термоэлементов	1
Поле зрения, град	5
Точность измерения, °C	до $\pm 0,2$
Фокусное расстояние, м	до 1

Важно понимать, что приведённая точность гарантирована, когда датчик находится в тепловом равновесии и в изотермических условиях, на фокусном расстоянии от измеряемого объекта [40]. Эти условия обеспечиваются конструкцией калориметра.

Так, как диапазон измеряемых температур в наших экспериментах оценивается в диапазоне от 20 до 40 градусов Цельсия можем воспользоваться следующим графиком:

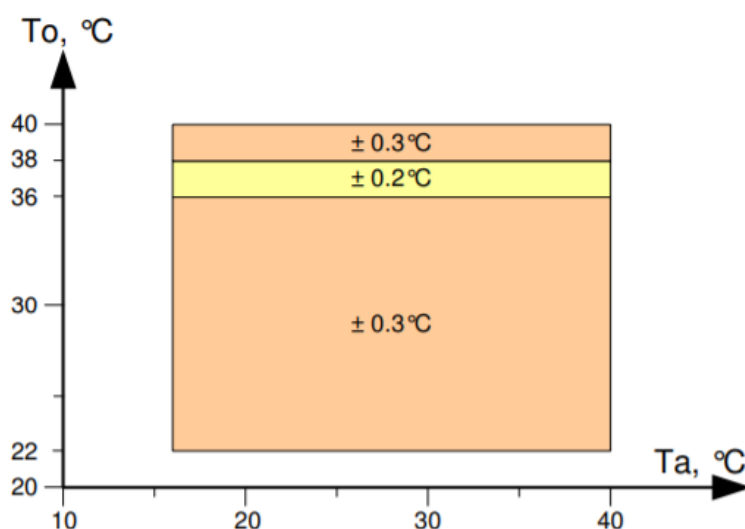


Рисунок 3.9 – Точность измерения температуры датчиком в зависимости от температуры корпуса датчика T_a и температуры измеряемого объекта T_o [40]

Как было указано выше точность датчиков при соблюдении необходимых условий будет варьироваться от $\pm 0,3$ до $\pm 0,2$ $^\circ\text{C}$, что вполне приемлемо в условиях наших экспериментов.

На рисунке 3.10 изображена зависимость полноты поступающего сигнала от угла падения инфракрасного излучения.

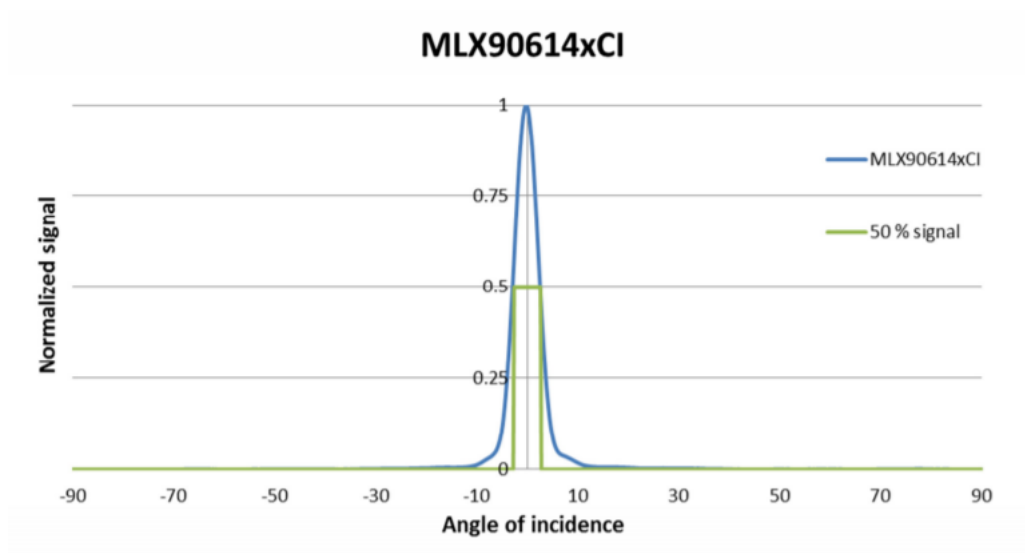


Рисунок 3.10 – Зависимость полноты поступающего сигнала на чувствительный элемент датчика от его угла падения [40]

Конструкция коллектора и блока датчиков обеспечивает оптимальный угол падения излучения на чувствительный элемент датчика.

3.1.2.2 Контроллеры

В качестве контроллеров для управления системой датчиков были выбраны Atmel Atmega328 на базе отладочных плат Arduino Nano [41].



Рисунок 3.11 – Внешний вид отладочной платы Arduino Nano [41]

Каждая отладочная плата может обеспечивать питанием до 18 датчиков, а встроенный UART позволяет осуществлять передачу данных на скорости 115200 бод.

Краткие характеристики платы указаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные характеристики отладочной платы Arduino Nano (Atmega328) [41].

Микроконтроллер	АТmega328
Рабочее напряжение (логическая уровень)	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	8
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Флеш-память	32 Кб при этом 2 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб
EEPROM	1 Кб
Тактовая частота	16 МГц
Размеры	1.85 см x 4.2 см

Подобные платы широко распространены, имеют низкую стоимость, удобное программное обеспечение и достаточную вычислительную мощность.

3.1.3 Программное обеспечение

Для управления прибором с компьютера и последующей удобной обработки данных была разработана и написана программа в пакете Matlab R2018b. На основе программы разработано оконное приложение, не требующее установки самого программного пакета Matlab, с возможностью быстрой установки и использования на любом компьютере с 64 битной операционной системой Windows версии не ранее Windows 7 Service Pack 1.

Выше было сказано, что для опроса системы из 61 датчика используются четыре контроллера Arduino Nano, три из которых работают с пятнадцатью, а один с 16 датчиками (рисунок 3.12)

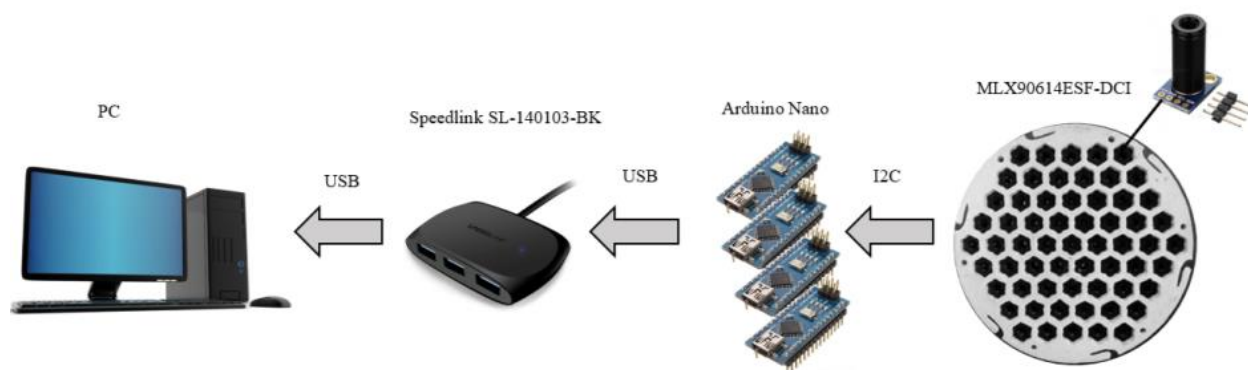


Рисунок 3.12 – Структурная схема измерения температуры

Каждый контроллер и датчик имеют уникальную прошивку, написанную в программе Arduino IDE. Уникальность прошивки датчиков заключается в его адресе, а для контроллеров – в наборе адресов опрашиваемых датчиков каждым отдельным контроллером. Карту адресов датчиков, номеров секций и деление всего массива на сектора опроса можно увидеть на рисунке 3.13.

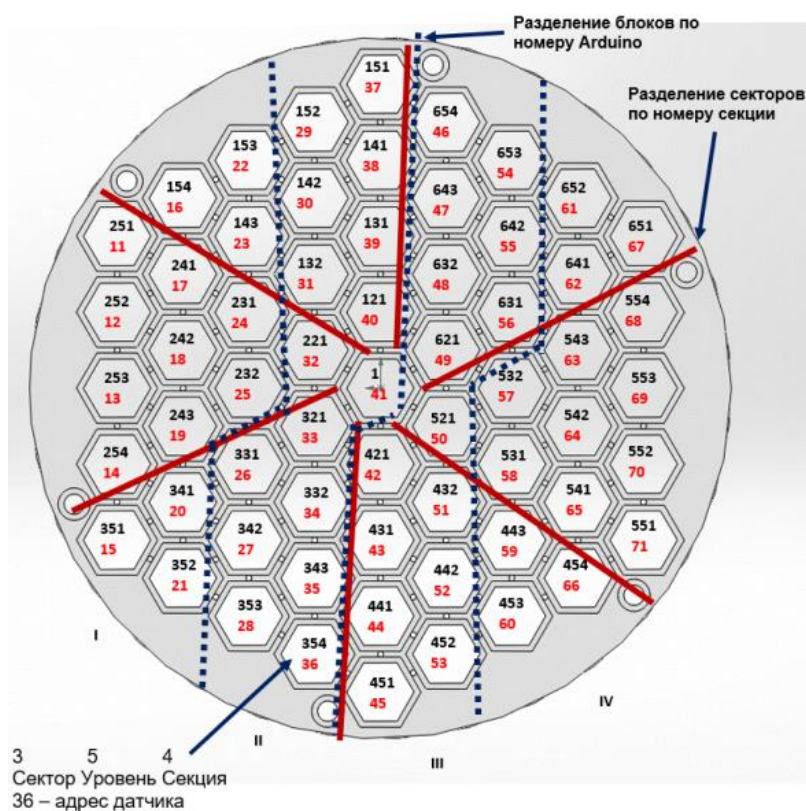


Рисунок 3.13 – Схема адресации датчиков и расположения номеров секций

Подобная система позволяет совершать опрос датчиков с частотой до 40 Гц.

Интерфейс оконного представлен на рисунке 3.14.

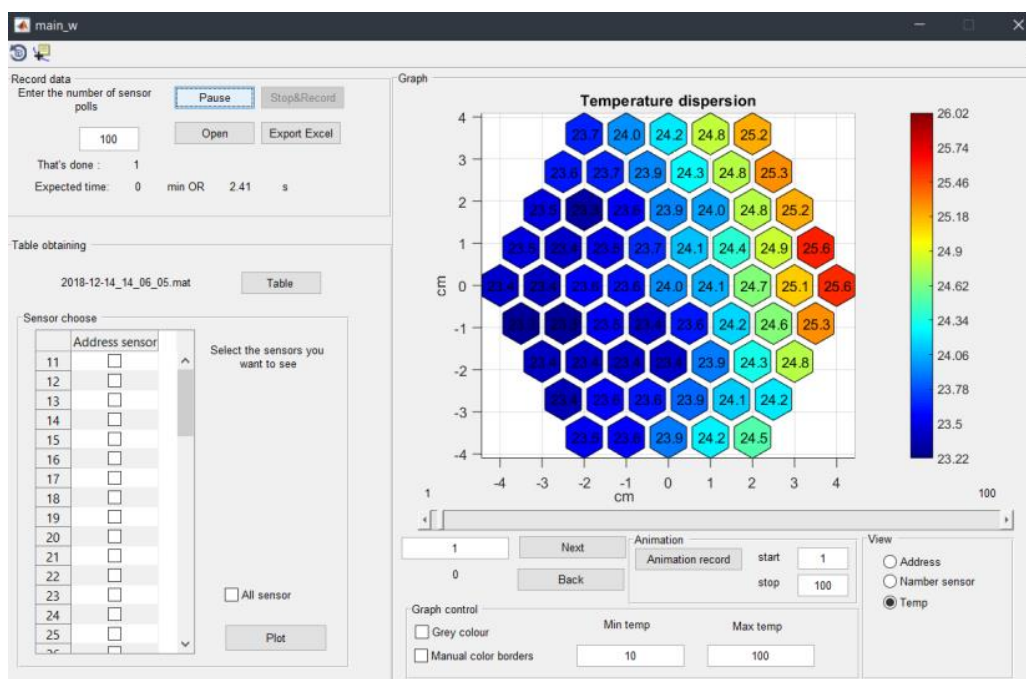


Рисунок 3.14 – Интерфейс программы для обработки данных с калориметра

Основные функции приложения:

1. Опрос подсистемы датчиков;
2. Запись данных в ПЗУ;
3. Представление экспериментальных данных в виде таблиц mat;
4. Формирование файла Excel с полученными данными;
5. Расчет энергии, выделившейся на секциях;
6. Вывод одномерных графиков температуры и энергии на секциях в количестве от 1 до 61;
7. Построение 3D диаграммы распределения температуры и энергии на секционированном коллекторе с фиксированной и адаптивной шкалой температуры;
8. Отображение в 3D диаграмме следующих данных (температура секции, номер секции, адрес датчика);

9. Прогноз времени опроса датчиков;
10. Коррекция данных.

3.1.4 Сборка устройства

Основные этапы сборки калориметра можно представить следующим образом:

1. Печать корпусов коллектора, блока датчиков и шунта ЦФ;
2. Изготовление медных секций, шин ЦФ, шин датчиков и защитного экрана;
3. Соединение медных секций с пластиковым корпусом коллектора, монтаж матрицы датчиков,
4. Пайка токопроводов и резисторов;
5. Монтаж основных узлов устройства в единую сборку;

Основные этапы в создании устройства можно увидеть на рисунке 3.15.

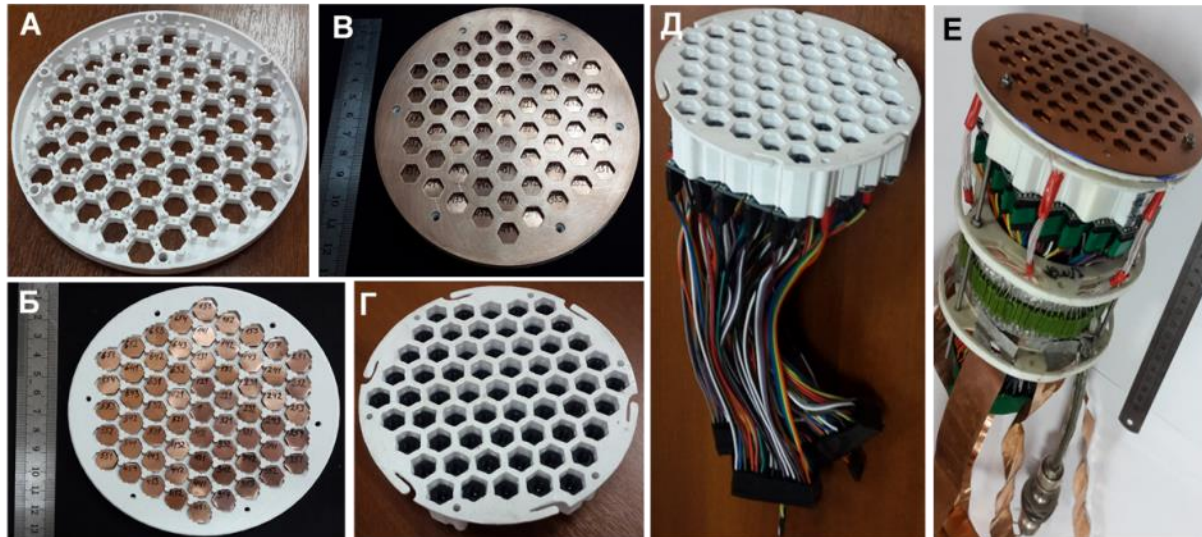


Рисунок 3.15 – Этапы сборки устройства: А – 3D-печать основных узлов; Б – монтаж и пайка секций; В – изготовление и монтаж защитного экрана; Г – монтаж матрицы блока датчиков; Д – создание и монтаж информационных шин и шин питания для датчиков; Е – изготовление шунта ЦФ, финальная сборка основных компонентов в единый блок устройства

3.1.5 Калибровка температурных датчиков

Известно, что с изменением температуры тела его теплоемкость и коэффициент излучения его поверхности могут изменяться. Чтобы учесть эти факторы было решено провести калибровку датчиков MLX90604ESF-DCI по показаниям температуры в диапазоне работы нашего прибора. Кроме того, калибровка позволит учесть систематическую ошибку в измерениях температуры.

Для того, чтобы провести калибровку был изготовлен стенд, схематично изображенный на рисунке 3.16.

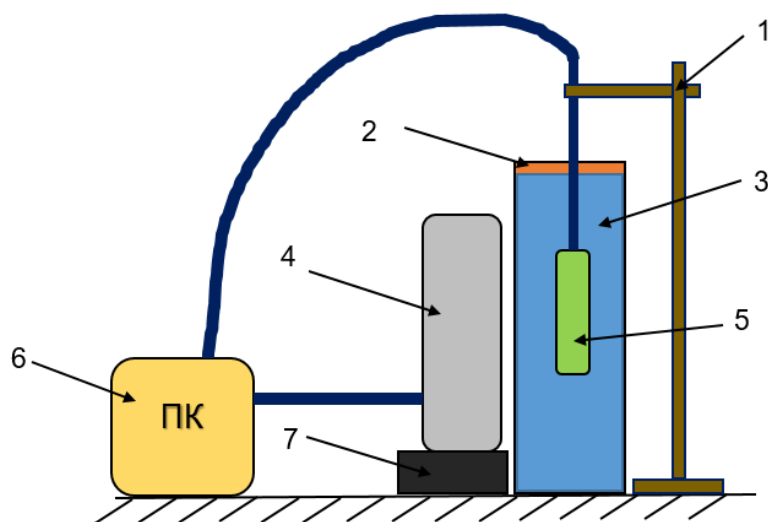


Рисунок 3.16 – Калибровка датчиков температуры: 1 – штатив для крепления термопарного температурного датчика; 2 – медная кювета; 3 – вода; 4 – блок бесконтактных температурных датчиков; 5 – термопарный температурный датчик; 6 – персональный компьютер; 7 – подставка для блока бесконтактных датчиков

В медную кювету (2) помещалась вода (3) температурой порядка 50 °С, что соответствует верхней границе температурных измерений разработанным прибором. Туда же помещался температурный термопарный датчик DS18B20 [42] (5). Данный датчик также подключался через контроллер Arduino к компьютеру(6). С одной стороны кювета зачернялась матовой акриловой краской, подобной той, что использовалась в зачернении секций. С этой же

стороны устанавливался блок температурных датчиков MLX90604ESF-DCI. Таким образом, обе системы датчиков фиксировали изменение температуры воды с остыванием, в допущении что стенка кюветы и вода имеют примерно одинаковую температуру. То есть проводилась калибровка бесконтактных датчиков относительно термпарного датчика. Калибровка состояла из трех серий измерений.

Зависимость показаний температуры термпарного датчика от показаний каждого из датчиков искалась в форме:

$$T_{\text{термоп}} = a_i \times T_{\text{инфрак}} + b_i, \quad (3.1)$$

где a_i , b_i – корреляционные коэффициенты, которые определены для каждого датчика статистическим путем.

На рисунке 3.17 изображены кривые изменения температуры воды в кювете: синяя кривая получена с термпарного датчика, красная – результат усреднения температуры со всех датчиков с учетом калибровочных коэффициентов.

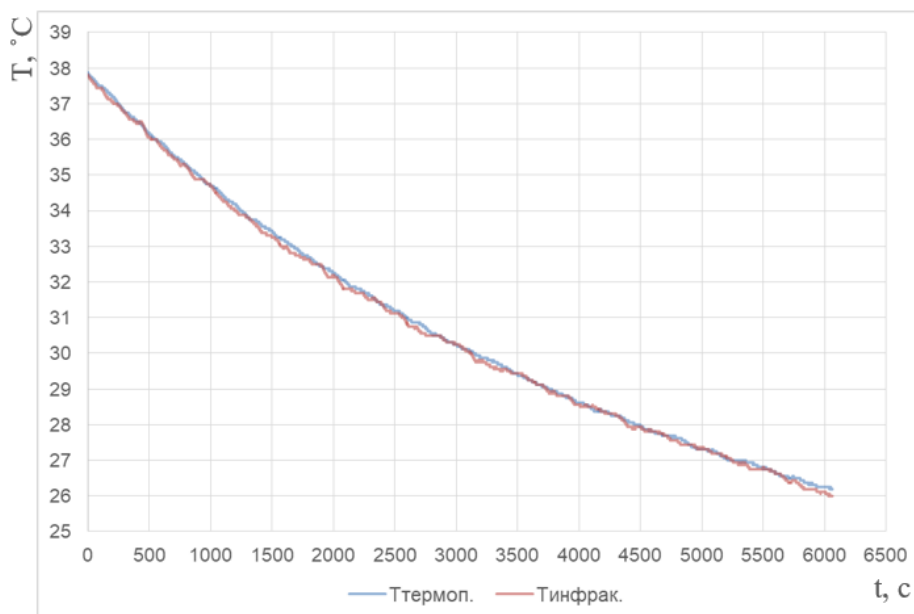


Рисунок 3.17 – Сравнительный график изменения температуры воды в кювете

По результатам эксперимента была рассчитана погрешность калибровки, которая составила ± 0.4 °C.

3.2 Постановка эксперимента

Эксперимент по определению характеристик электронного пучка проводился на импульсном электронном ускорителе «Астра-М», освещенным в Главе 2.

Схема эксперимента повторяет схему измерения, представленную на рисунке 3.1. отличительной чертой является монтаж дополнительной отсечной алюминиевой фольги на коллектор прибора на определенных этапах эксперимента. При отсутствии отсечной фольги и при толщинах фольг 50 мкм и 100 мкм измерения проводились после 10 импульсов. При толщине фольги 150 мкм измерения проводились после 15 импульсов.

Данные, полученные помощью разработанного устройства, сравнивались с показаниями штатных диагностических приборов ускорителя: интегральным калориметром и цилиндром Фарадея. Для обеспечения максимально приближенных друг к другу условий экспериментов на коллекторы обоих штатных устройств также как на коллектор разработанного устройства накладывался защитный экран, описанный выше.

В рамках эксперимента генератор импульсов данного ускорителя формировал импульсы ускоряющего напряжения амплитудой до 260 кВ, длительностью до 300 нс и частотой повторения 1 импульс в секунду. Катод выполнен из углеродного волокна Урал ТМ-4-22 марка А [43] и имеет диаметр 40 мм. Инжекция пучка в атмосферу производилась через мембрану выпускного окна, выполненную из 60-ти микронной титановой фольги. Ток и напряжение диода ускорителя были измерены с помощью пояса Роговского и высокочастотного емкостного делителя напряжения соответственно (Рисунок 3.18).

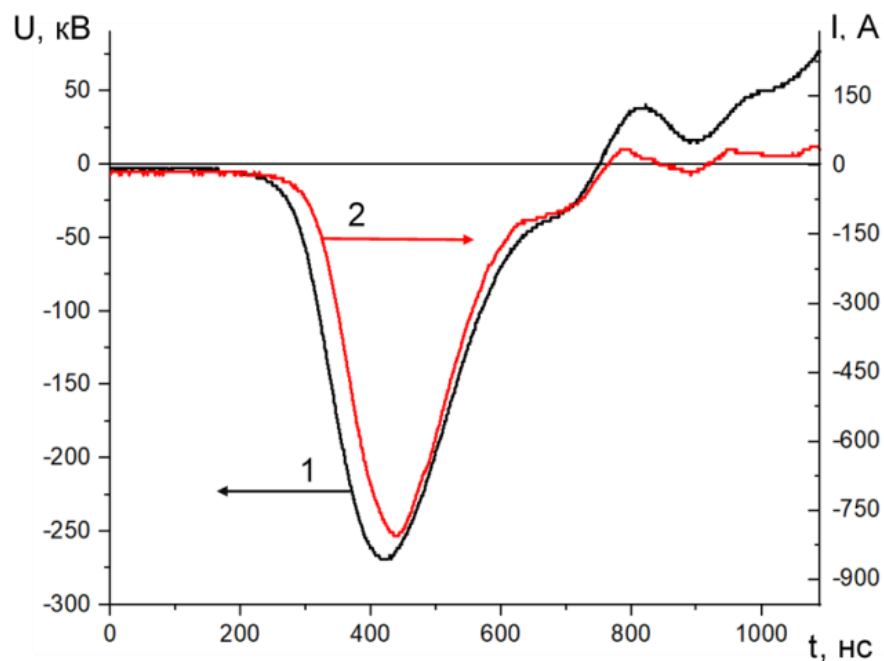


Рисунок 3.18 – Характеристические кривые: 1 – ускоряющее напряжение; 2 – полный ток диода.

3.3 Результаты

3.3.1 Оценка распределения энергии по сечению пучка

На рисунке 3.19 изображены графики энергии, полученной каждой секцией секционированного коллектора разработанного устройства за один импульс облучения. Порядок номеров секций на оси абсцисс выбран на основе разработанной нумерации (рисунок 3.13). Каждое деление (штриховая линия) соответствует уровню секции на коллекторе, то есть удалению (радиусу) от геометрического центра коллектора.

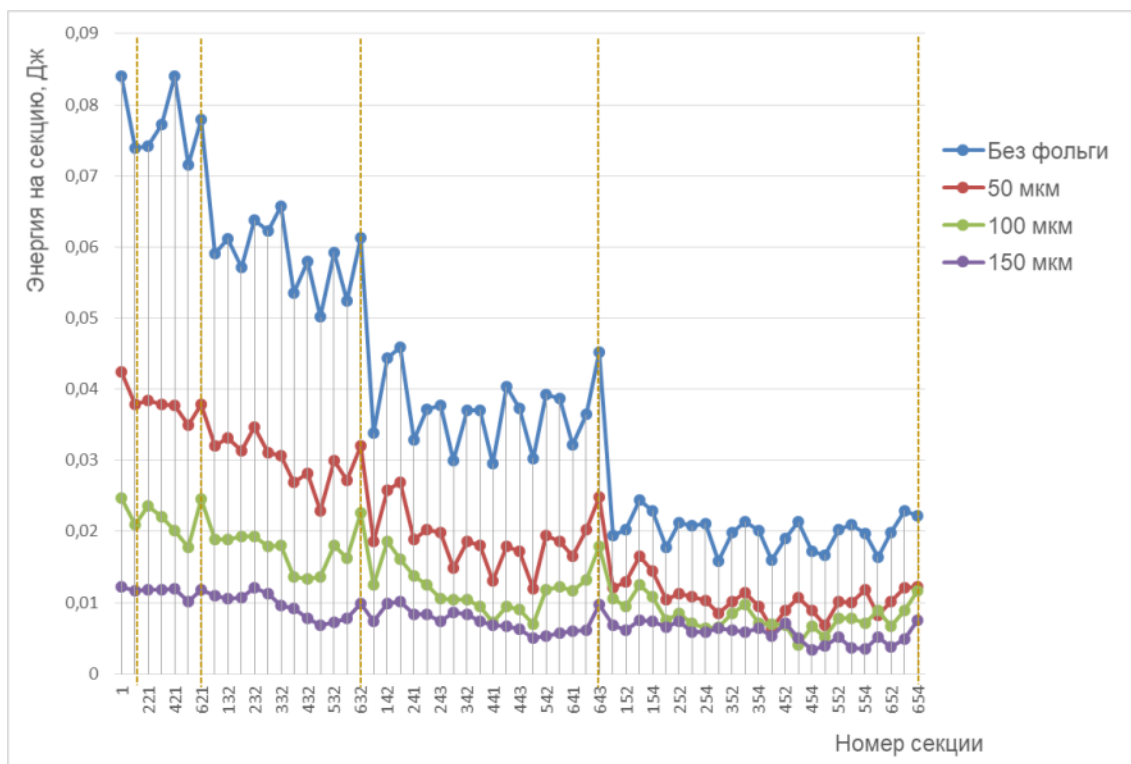


Рисунок 3.19 – Энергия электронного пучка, зарегистрированная секциями коллектора устройства после прохождения фольги 0 – 150 мкм

Из анализа результатов следует, что распределение энергии по сечению пучка имеет неравномерный характер, плотность энергии убывает с удалением от геометрического центра. Максимум энергии также смещен относительно центра. Это также хорошо видно из 3D диаграммы температуры секций после облучения, полученной в разработанном приложении (рисунок 3.20).

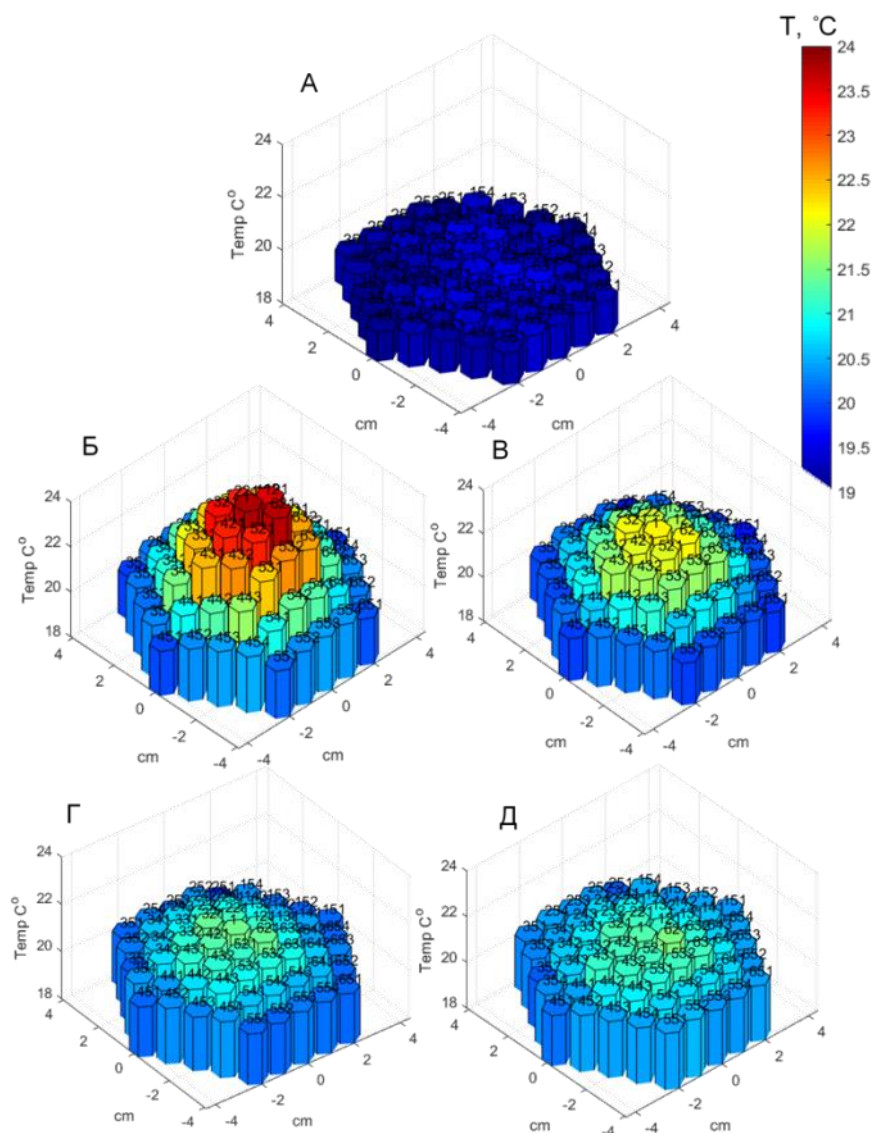


Рисунок 3.20 – Распределение температуры по коллектору устройства до и после облучения электронным пучком: А – до облучения; Б – без фольги, 10 импульсов; В – 50 мкм, 10 импульсов; Г – 100 мкм, 10 импульсов; Д – 150 мкм, 15 импульсов

Видно, что распределение энергии по сечению пучка в целом повторяется с наращиванием толщины отсечной фольги. Однако объективно можно говорить о том, что низко энергичная часть спектра электронов в пучке находится вблизи геометрического центра выпускного окна ускорителя.

В ходе эксперимента ошибка измерений полной энергии пучка электронов секционированным калориметром не превышала $\pm 8\%$,

интегральным - $\pm 5\%$. Разница в измерениях полной энергии пучка электронов секционированным и интегральным калориметрами не превышала 10%.

Скорость охлаждения секции после облучения составила ~ 0.25 °C/с. Учитывая, что промежуток времени между окончанием облучения и считыванием показаний с датчиков температуры составляет менее 1 секунды, потери энергии на теплопроводность считались пренебрежительно малы и не учитывались.

3.3.2 Определение спектра кинетических энергий электронов

Сигналы тока, зарегистрированного всеми секциями, на шунте цилиндра Фарадея разработанного устройства при использовании отсечных фольг различной толщины и сигнала ускоряющего напряжения изображены и на рисунке 3.21.

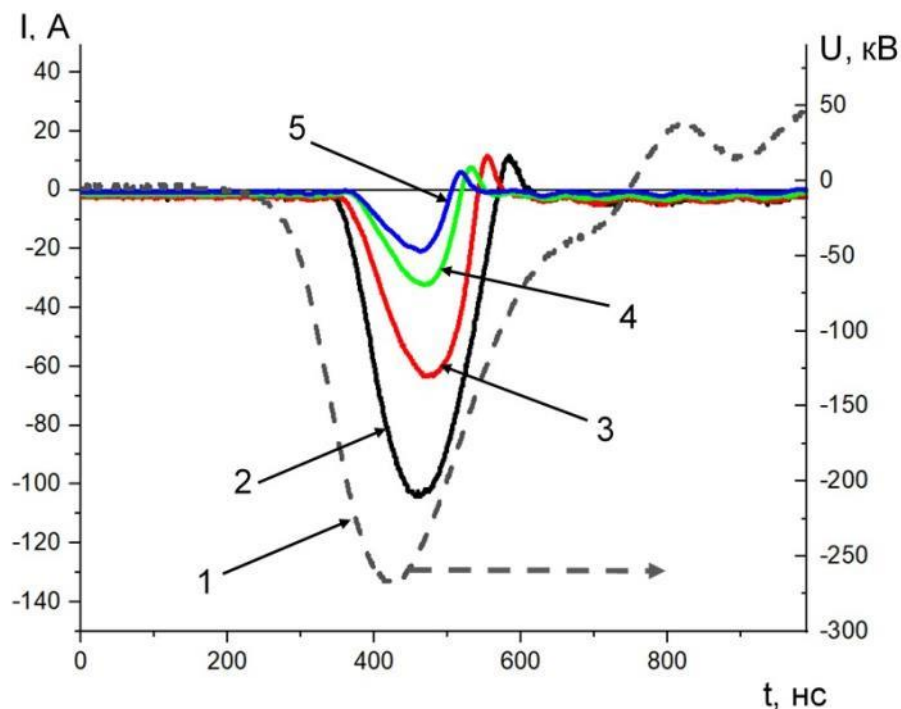


Рисунок 3.21 – Сигналы ускоряющего напряжения (1) и тока на шунте ЦФ прибора: 2 – без фольги; 3 – 50 мкм; 4 – 100 мкм; 5 – 150 мкм

Полученные данные наглядно отображают тот факт, что с увеличением толщины отсечной фольги уменьшается количество прошедших через нее электронов. Кроме того, с увеличением толщины отсечной фольги уменьшается ширина импульса тока. То есть на графике мы видим ток более высокоэнергичных электронов, ускоренных импульсом напряжения в промежутки времени с большей разностью потенциалов. Ошибка измерения заряда секционированном и штатным ЦФ в серии экспериментов не превышала 5 %.

На рисунке 3.22 изображен спектр кинетических энергий электронов в пучке, измеренный секционированным коллектором ЦФ. Энергия электронов необходимая для преодоления алюминиевой фольги определялась в соответствии с базами данных ESTAR [44].

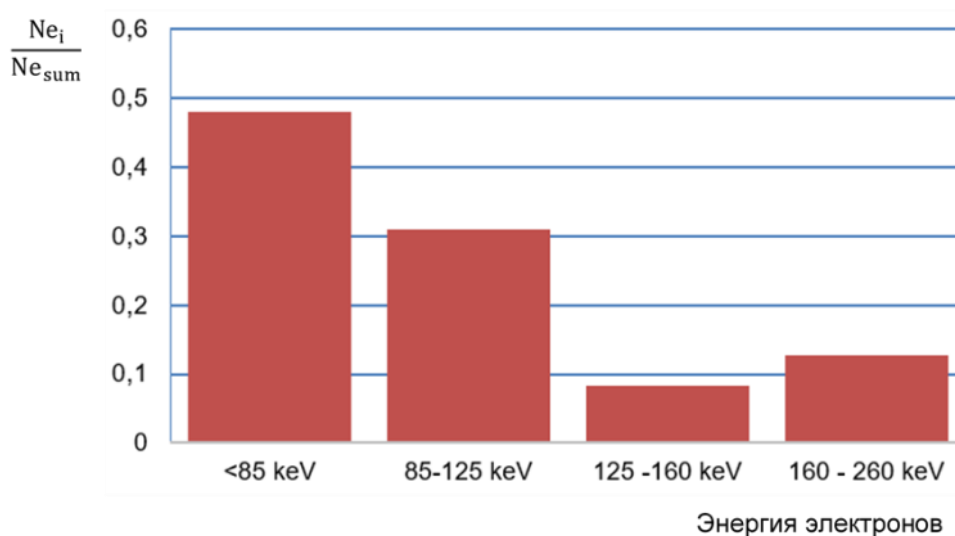


Рисунок 3.22 – Спектр электронов в пучке, измеренный секционированным коллектором ЦФ

Видно, что большая часть электронов обладает энергией в диапазоне до 85 кэВ.

На рисунке 3.23 изображен график спектра электронов в пучке, измеренная штатным ЦФ.

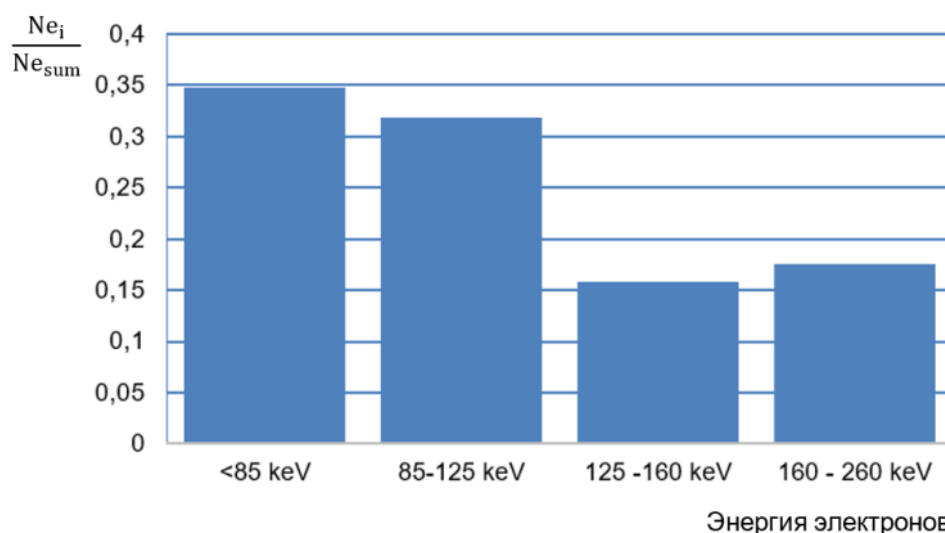


Рисунок 3.23 – Спектр электронов в пучке, измеренный штатным ЦФ

По результатам измерений можно отметить, что качественно спектр электронов, измеренный штатным ЦФ, совпадает со спектром, измеренным разработанным устройством. Количественная разница может объясняться особенностями электрической схемы разработанного прибора, токами утечки, конструкцией секционированного коллектора.

3.3.3 Оценка распределения средней кинетической энергии электронов по сечению пучка

На основании проведенных расчетов были проведена оценка энергии, внесённой в секционированный коллектор электронами из каждого диапазона кинетических энергий (см. Рисунок 3.22). Энергия, переносимая электронами в диапазоне двух кинетических энергий, может быть найдена путем вычитания соответствующих значений энергии для каждой секции. Результаты в абсолютных значениях представлены на рисунке 3.24.

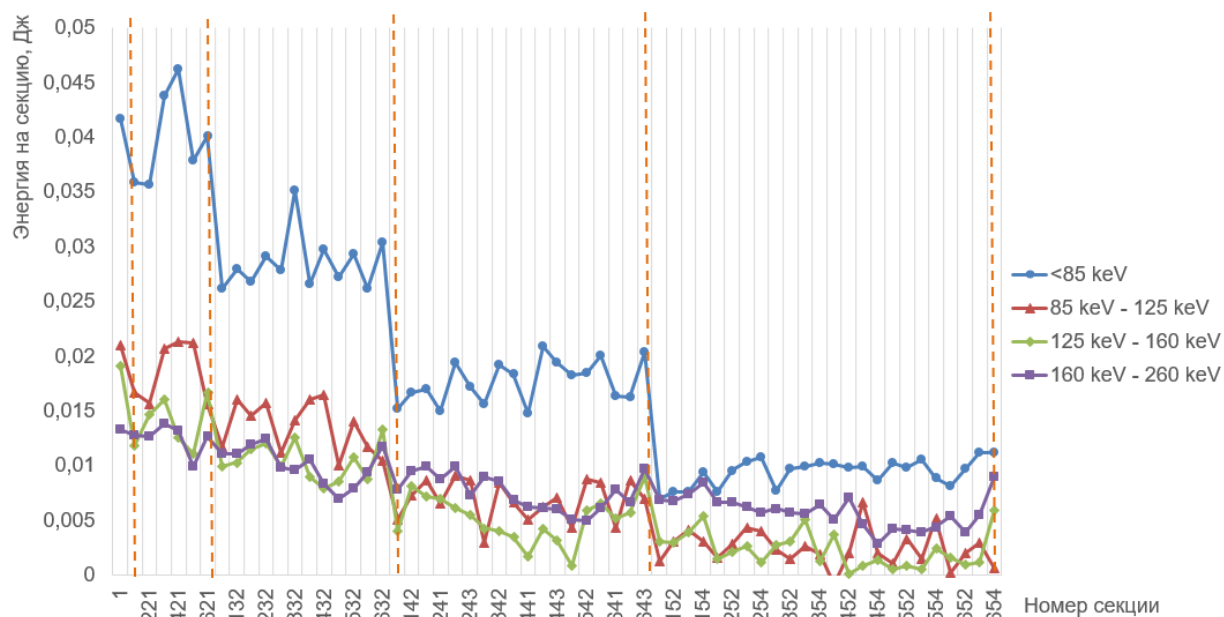


Рисунок 3.24 – Энергия, внесенная в коллектор электронами с разной кинетической энергией

Также для сравнительной оценки распределения электронов в каждом диапазоне кинетических энергий по сечению значения выражали в относительных единицах (рисунок 3.25).

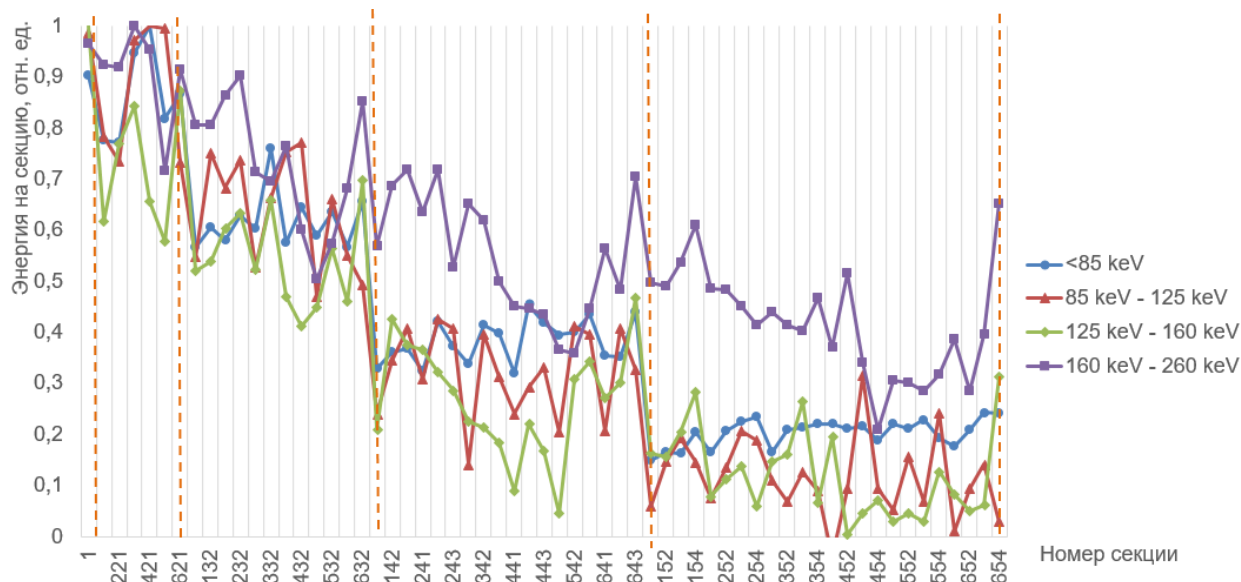


Рисунок 3.25 – Энергия, внесенная в коллектор электронами с разной кинетической энергией в относительных единицах

Из эксперимента следует, что большая часть энергии пучка переносится низкоэнергетичными электронами.

Было обнаружено, что максимум энергии лежит в центре только для одного из энергетических диапазонов 125 кэВ – 160 кэВ.

В целом распределение электронов по сечению для всех диапазонов энергий одинаково. Однако, следует отметить, что распределение высокоэнергетичных электронов более равномерно.

Для наглядности была построена 3D диаграмма распределения электронов в каждом диапазоне кинетических энергий по сечению пучка (Рисунок 3.26).

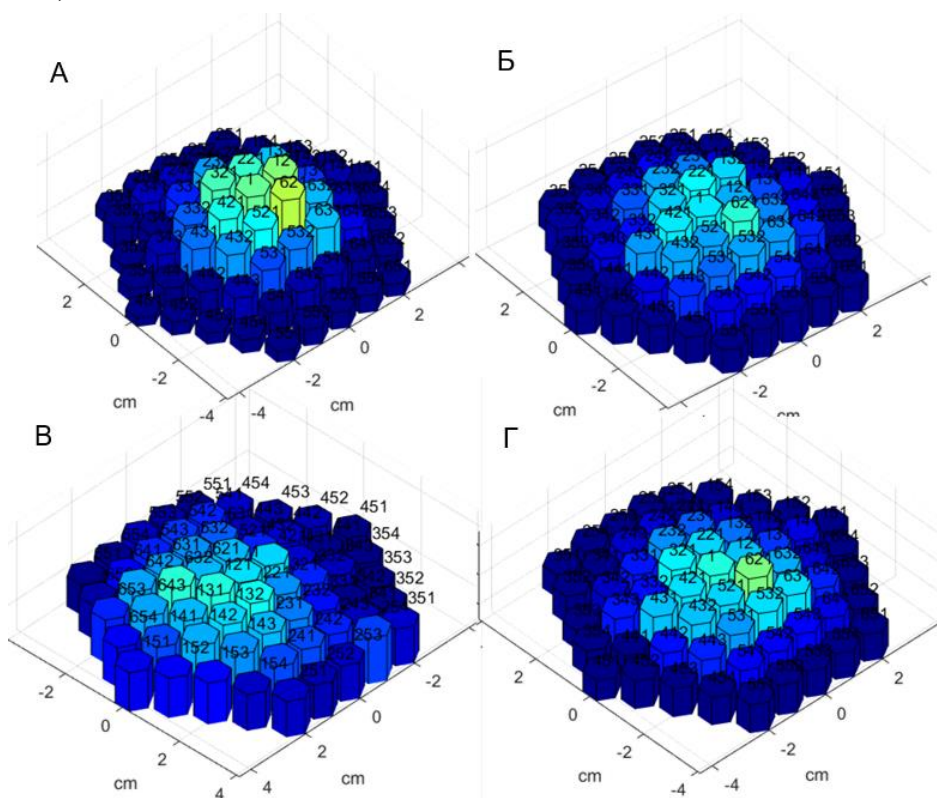


Рисунок 3.26 – Распределение распределения электронов в каждом диапазоне кинетических энергий по сечению пучка: А – <85 кэВ; Б – 85 кэВ – 125 кэВ; В – 125 кэВ – 160 кэВ; Г – 160 кэВ – 260 кэВ

Экспериментальные данные и результаты расчетов позволяют качественно оценить распределения энергии по сечению импульсного электронного пучка.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка потенциала разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса. Таким образом была проведена оценка затрат, потенциала и академической привлекательности проводимого исследования.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данное исследование может быть полезным для диагностики электронных пучков наносекундной длительности.

Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка разрабатывалось с целью диагностики электронного пучка в процессе пуско-наладочных и научно-исследовательских работ. Таким образом, деятельность разработчиков прибора ориентирована на научно-исследовательские команды, занимающиеся разработкой и выпуском импульсных ускорителей электронов. В России существует много научных коллективов, занимающихся данным

вопросом (г. Томск, г. Саров, г. Екатеринбург и др.). Также множество исследований в данной области проводятся и за границей. К числу лидеров иностранных государств по разработке импульсных ускорителей электронов следует отнести США, Китай, Японию.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ был проведен с помощью оценочной карты, приведенной в табл. 4.1. В качестве конкурирующих разработок были приняты: способ определения кинетической энергии электронов методом

тормозящего поля – K1 [11], способ определения кинетической энергии электронов с помощью фольговых ЦФ – K2 [9].

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 4.1, подбирались, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Основными критериями оценки методов определения кинетической энергии электронов будут являться: возможность определения кинетической энергии электронов, возможность определения распределения плотности энергии в сечении пучка, возможность определения выведенного за анод заряда пучка, точность, удобство обработки данных.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Возможность определения кинетической энергии электронов	0,3	5	5	5	1,5	1,5	1,5
2. Возможность определения распределения плотности энергии в сечении пучка	0,2	5	1	5	1	0,2	1
3. Возможность определения выведенного заряда за анод пучка	0,2	5	5	1	1	1	0,2
4. Точность измерения исследуемых характеристик	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
5. Удобство обработки данных	0,1	5	3	2	0,5	0,3	0,2
Итого	1	24	17	16	4,8	3,6	3,5

Позиция разработки и конкурентов оценивалась по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны были составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определялся по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя. К главному конкурентному преимуществу производимого продукта, можно отнести возможность относительно точного определения распределения плотности энергии в сечении пучка и выведенного за анод заряда пучка, помимо определения кинетической энергии электронов. Это качество в совокупности с остальными помогут завоевать доверие пользователей путем предложения товара высокого качества со стандартным набором определяющих его параметров.

4.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны	Слабые стороны
Внутренняя среда	S (Strengths)	W (Weakness)
	<p>С1. Значительная академическая ценность, т.е. ценность результатов исследования и путей научного поиска;</p> <p>С2. Хорошая точность проводимых измерений;</p> <p>С3. Большой функционал устройства.</p>	<p>Сл1. Необходим персонал, имеющий высокую квалификацию;</p> <p>Сл2. Недостаток финансовых средств;</p> <p>Сл3. Большие временные затраты.</p>
	Возможности	Угрозы
Внешняя среда	O (Opportunities)	T (Threats)
	<p>В1. Использование научно-технической базы ТПУ для проведения необходимых исследований;</p> <p>В2. Повышение стоимости конкурентных разработок;</p> <p>В3. Публикации в высокорейтинговых изданиях.</p>	<p>У1. Отсутствие спроса на разработанное устройство со стороны предприятий и научно-исследовательских центров, как следствие отсутствие масштабной технологии производства;</p> <p>У2. Развитие альтернативных технологий и аналогов;</p> <p>У3. Снижение финансирования со стороны государства.</p>

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		С1	С2	С3
	В1	+	+	+
	В2	0	+	+
	В3	+	+	0

Из анализа интерактивной матрицы проекта можно выявить преобладающее направление реализации проекта: B1C1C2C3.

В таблице 4.4 представлен SWOT-анализ виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 4.4 – итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Значительная академическая ценность, т.е. ценность результатов исследования и путей научного поиска; С2. Хорошая точность проводимых измерений; С3. Большой функционал устройства.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Необходим персонал, имеющий высокую квалификацию; Сл2. Недостаток финансовых средств; Сл3. Большие временные затраты.
Возможности: В1. Использование научно-технической базы ТПУ для проведения необходимых исследований; В2. Повышение стоимости конкурентных разработок; В3. Публикации в высокорейтинговых изданиях.	<ul style="list-style-type: none"> • Использование научно-технической базы ТПУ улучшения характеристик устройства и как следствие точности измерений; • Повышение интереса со стороны предприятий научно-исследовательских групп при увеличении стоимости конкурентных разработок. 	<ul style="list-style-type: none"> • Использование научно-технической базы ТПУ для снижения временных затрат на изготовление, калибровку и испытания устройства; • Привлечение новых специалистов после печати в высокорейтинговых изданиях
У1. Отсутствие спроса на разработанное устройство со стороны предприятий и научно-исследовательских центров, как следствие отсутствие масштабной технологии производства; У2. Развитие альтернативных технологий и аналогов; У3. Снижение финансирования со стороны государства.	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение точности и функциональности может повысить спрос; • Значительная академическая ценность создает необходимость дальнейшего финансирования. 	<ul style="list-style-type: none"> • Необходимость в наличии персонала, имеющего высокую квалификацию для эксплуатации устройства, негативно скажется на спросе на устройство; • Снижение финансирования при усугубит временные затраты при изготовлении и модернизации устройства.

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия

сотрудничества с Российским научным фондом, а также с Томским политехническим университетом и другими университетами, и институтами, проведение совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Данные о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1

Продолжение таблицы 4.5.

7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	3
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	1	3
	Итого баллов	24	43

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (4.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания

разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом в данный момент разработка не готова для коммерческой реализации. Необходимо более детально проработать большинство вопросов, представленных в перечне выше. Также возможно привлечение квалифицированных кадров, что в дальнейшем положительно скажется на успешности коммерциализации.

4.4 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются заинтересованные стороны проекта, изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Российский научный фонд	Создание диагностического устройства в области импульсной энергетики, успешная конкуренция с ведущими странами в этом направлении (США, Китай, Япония)
Томский политехнический университет	Публикация результатов работы в высокорейтинговых журналах

Таблица 4.7 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка и изготовление устройства для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка
Ожидаемые результаты проекта:	Создание автоматизированного устройства, способного измерять качество оценить спектр кинетических энергий электронов. Написание статьи в высокорейтинговые журналы по результатам работы.
Критерии приемки результата проекта:	Получены положительные результаты при проведении испытаний устройства. Опубликована статья в изданиях, индексируемых в SCOPUS или Web of Science импакт-фактор которых не менее 2.
Требования к результату проекта:	Устройство позволяет определить среднюю кинетическую энергию электронов по сечению пучка
	Устройство работает стабильно.
	Устройство автоматизировано.

4.4.1 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Данная информация представлена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, часы
1	Егоров И. С., н.с. НПЛ ИПЭПТ ТПУ, к.т.н, доцент ОМ	Руководитель проекта	Координация реализации научного исследования	35

Продолжение таблицы 4.8.

2	Серебренников М. А., инженер НПЛ ИПЭПТ ТПУ	Исполнитель проекта	Проведение экспериментальной работы, обработка и анализ данных, написание статьи	534
ИТОГО:				569

В ходе реализации научного проекта, помимо магистранта, задействован ряд специалистов:

Руководитель проекта – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.

Исполнитель проекта – специалист, выполняющий отдельные работы по проекту. В случае, если магистерская работа является законченным научным исследованием – исполнителем проекта является магистрант. В случае, если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

4.4.2 Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 4.9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	329 469 руб.
3.1.1. Источник финансирования	12.2015.РНФ.2018, НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	01.02.2019 – 30.05.2019

Продолжение таблицы 4.9.

3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	20.12.2018
3.2.2. Дата завершения проекта	14.06.2019
3.3. Прочие ограничения и допущения	нет

4.5 План проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – План проекта с этапами работ и распределением исполнителей по их видам

Номер работы	Название	Длительность, дни	Дата начало работ	Дата окончания работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение технического задания	5	01.02.2019	06.02.2019	Руководитель
2	Подбор и изучение материалов по теме исследования	17	07.02.2019	27.02.2019	Инженер (дипломник)
3	Выбор направления исследований	4	28.02.2019	04.03.2019	Руководитель, Инженер (дипломник)
4	Календарное планирование работ по теме	4	05.03.2019	11.03.2019	Руководитель

Продолжение таблицы 4.10.

5	Моделирование конструкции устройства и написание программного обеспечения	20	12.03.2019	3.04.2019	Инженер (дипломник)
6	Изготовление устройства	12	4.04.2019	17.04.2019	Инженер (дипломник)
7	Автоматизация устройства	9	18.04.2019	27.04.2019	Руководитель, Инженер (дипломник)
8	Проведение испытаний устройства	4	28.04.2019	7.05.2019	Руководитель, Инженер (дипломник)
9	Обработка результатов исследований	2	08.05.2019	13.05.2019	Инженер (дипломник)
10	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	12	14.05.2019	27.05.2019	Инженер (дипломник)
11	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки, составление презентации и подготовка к защите	9	28.05.2019	6.06.2019	Руководитель, Инженер (дипломник)
Итого		98			

4.6 Разработка графика проведения НИОКР

Для удобства и наглядности была выбрана «Диаграмма Ганта».

Календарный план-график строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 4.11

Таблица 4.11 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.			март			апрел.			май			июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Р	5														
2	Подбор и изучение материалов по теме исследования	И	20														
3	Выбор направления исследований	Р, И	5														
4	Календарное планирование работ по теме	Р	4														
5	Моделирование конструкции устройства и написание программного обеспечения	И	25														
6	Изготовление устройства	И	15														
7	Автоматизация устройства	Р, И	10														
8	Проведение испытаний устройства	Р, И	5														
9	Обработка результатов исследований	И	5														
10	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	И	15														

Продолжение таблицы 4.11.

[illegible]

■ - инженер (дипломник); ■ - руководитель.

4.7 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением [16,17]. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.7.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для

выполнения работ по данной теме. Количество требуемых материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам.

Эксперименты проводились 6 дней по 3 часа в день (18 часов), приблизительная мощность импульсного ускорителя электронов составляет 8,5 кВт/час.

Работа за компьютером проводилась в течение 85 дней по 4 часа в день (340 часа). Потребление электроэнергии компьютером составляло 90 Вт/ч.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (4.3)$$

где $C_{эл}$ – тариф на электроэнергию (5,8 руб за 1 кВт/ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{эл} = 5,8 \cdot (8,5 \cdot 18 + 0,09 \cdot 340) = 1065 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости материальных затрат на материалы представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

№	Материал	Единица материала	Цена, руб/ед.	Количество материала	Затраты, руб.
1	ABS пластик	кг	20000	0,125	2 500
2	Лист Медь М1	шт	1386	1	1 386
3	Температурные датчики MLX90614ESF-DCI	шт	2816	61	171 776
4	Микроконтроллеры Arduino Nano V3.0	шт	420	4	880
5	Джамп-провода	шт	6	160	960
6	Провод МГТФ-0,12	м	12	15	180
Итого					177 682

4.7.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данной теме. Определение стоимости спецоборудования производилось по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта, учитывалась в виде амортизационных отчислений. Сумма амортизации за один год рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{F_{\text{п}} * a}{100\%}, \quad (4.4)$$

где $F_{\text{п}}$ - первоначальная стоимость оборудования, a – норма амортизации, рассчитываемая по формуле:

$$a = \frac{1}{t} * 100\%, \quad (4.5)$$

где t – это срок полезного использования установки.

Первоначальную стоимость импульсного ускорителя электронов можно оценить в 5 000 000 руб, а срок полезного использования 20 лет, тогда годовая сумма амортизационных отчислений $A_{\text{год}} = \frac{5000000 * 5}{100\%} = 250\,000$ руб. В рамках данного исследования установка использовалась в течение 6 дней, поэтому сумма амортизации составит:

$$A = \frac{250000 * 6}{365} = 4\,110 \text{ руб.}$$

4.8 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (4.6)$$

где, $З_{осн}$ – основная заработная плата, $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (10 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где $З_{осн}$ – *основная* заработная плата одного работника, T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн., $З_{дн}$ – *среднедневная* заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.8)$$

Где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; при отпуске в 48 раб. дней $M =$

10,4 месяца, 6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.9)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	33664	0,3	-	1,3	56 892	2 357	6	24 144
Инженер	12663	0	-	1,3	16 462	682	89	60 689
Итого $Z_{осн}$								84 842

4.8.1 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times З_{\text{осн}} = 8\,483 \text{ руб.}, \quad (4.10)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}} = 0,1$); $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.14 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.15 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	24 144	60 689
Дополнительная зарплата	2 414	6 069
Зарплата исполнителя	26 558	66 758
Итого по статье $C_{\text{зн}}$, руб	93 316	

4.9 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.11)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), дополнительная зарплата отсутствует.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2017 году вводится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.+дополнит.	26 558	66 758
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Сумма отчислений	7 197	18 091
Итого	25 288	

4.10 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.12)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (84842 + 8483) = 27998 \text{ руб.}$$

4.11 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	177 682
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	84 842
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8 484
4. Отчисления во внебюджетные фонды	25 288
5. Прочие прямые затраты	1 065
6. Накладные расходы	27 998
7. Затраты на спец. оборудование	4110
Бюджет затрат НТИ	329 469

4.12 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Данные рисков проекта сведены в таблицу 4.18.

Таблица 4.18 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Недостаточная чувствительность прибора к диагностическим пучкам	Невозможность определения средней кинетической энергии электронов	3	4	Средний	Изготовление дополнительного набора более чувствительных элементов	Испытания на низкоэнергетических пучках
2	Плохая помехоустойчивость прибора	Нестабильная работа во время измерения	2	3	Средний	Экранирование основных узлов прибора	Сильные радиопомехи во время работы ускорителя

4.13 Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^{p, a1, a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (4.13)$$

где I_{ϕ}^p - интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналог).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы. В данной работе интегральные финансовые показатели

разработки и аналогов были взяты за 1 из-за сложности расчета финансовых затрат на разработку аналогов.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (4.14)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра; b_i^a , b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже. Таблица 4.19 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Экономичность технологии	0,1	4	5	5
2. Простота обслуживания	0,1	4	5	3
3. Дополнительная функциональность	0,2	5	3	3
4. Простота обработки данных	0,3	5	1	1
5. Точность прибора	0,3	5	3	3
ИТОГО	1	28	21	11

$$I_m^p = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,3 = 4,8$$

$$I_1^{a1} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,3 = 2,8$$

$$I_1^{a2} = 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,3 = 2,6$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{финр}^p$) и аналога ($I_{финр}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,7}{1} = 4,8$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_\phi^{a1}} = \frac{3,9}{1} = 2,8$$

$$I_{финр}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_\phi^{a2}} = \frac{1,8}{1} = 2,6$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финаi}^{ai}}, \quad (4.15)$$

где \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта; $I_{мэ}^p$ – интегральный показатель разработки; $I_{мэ}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 4.20 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	3,9	2,6
3	Интегральный показатель эффективности	4,8	2,8	2,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,7	1,8

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Как видно из таблицы 4.20 разработанное устройство превосходит свои аналоги с точки зрения финансовой и ресурсной эффективности.

Глава 5. Социальная ответственность

Введение

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [46].

Правила по охране труда и технике безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками

В данной работе эксперименты производились на импульсном ускорителе электронов «Астра-М». Основным фактором опасности при работе ускорителя является тормозное рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронов в материале мишени (образца) и на стенках вакуумной камеры ускорителя. Кроме того, в состав ускорителя входят высоковольтные блоки, что создает дополнительную опасность поражения электрическим током при «закоротке» токоведущих частей на корпус ускорителя в случае пробоя изоляции. Также в ходе работы использовалась персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ). Следовательно, для внедрения определенных правил и мер предосторожности требуется разработать комплекс мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правил техники безопасности. Обучение персонала техник безопасности и производственной санитарии состоит и вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом (ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения).

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

К работе с ускорителем и всеми узлами данной установки допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с данной установкой, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора и имеющие не менее IV группы по электробезопасности (ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150).

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании (ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты).

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1

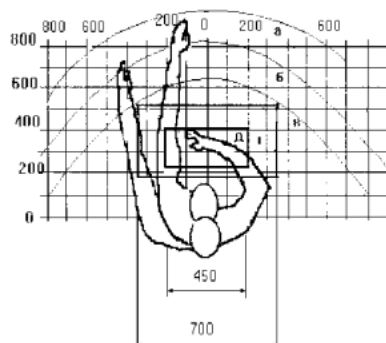


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; г – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2 Профессиональная социальная безопасность

5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Под опасным производственным фактором понимается фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме (высота, огонь, электрический ток, движущиеся предметы, взрыв). Вредным производственным фактором является фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию (неблагоприятный микроклимат, повышенный уровень шума, вибрации, плохое освещение, неблагоприятный состав воздуха) [46].

При работе с ускорителем и ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Исследование	
1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность – Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09. – Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность – ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 – Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» – Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность
2. Превышение уровня шума	-	-	+	
3. Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне	-	-	+	
4. Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	+	-	+	
5. Пожаровзрыво опасность	-	+	+	
6. Химические и токсические вещества	-	+	+	

На инженера, работающего установке «Астра-М» и на ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

1. физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещённость, наличие излучения, наличие токсичных веществ. Воздействие электромагнитного излучения было сведено к минимуму, так как при работе

на ПЭВМ использовался жидкокристаллический монитор;

2. психофизиологические: физические перегрузки (статические, динамические), нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [46] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой – 13–15 °С.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений.

Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека — не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

В ходе технологического процесса и при обслуживании установки в воздухе присутствуют пары диффузионного масла, этилового спирта, бензина, ацетона. Пары используемых при работе химических веществ воспламеняются, при смешивании с воздухом становятся взрывоопасными. Ацетон, бензин, этиловый спирт являются органическими растворителями, и относятся к четвертому классу опасности [47]. Проникая в организм человека через кожу и дыхательные пути, они вызывают острые и хронические отравления. При работе форвакуумного (механического) насоса в воздух выбрасываются пары масла, которые относятся к углеводородам, и также вредно влияют на организм.

В качестве защиты от вредных примесей в воздухе применяется естественная вентиляция и вытяжная система, обеспечивающие удаление из помещения загрязненного воздуха. Для удаления выхлопного газа форвакуумного насоса, содержащего пары масла, используется трубопровод, по которому выхлоп выводится за пределы рабочих помещений.

Работы, проводимые на рабочем месте, относятся к классу средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5-1 мм), поэтому уровень освещенности рабочего места должен составлять 500 лк. Распределение светового потока в поле зрения должно быть равномерным и быть удобным, т.е. должно быть предусмотрено естественное боковое и верхнее искусственное освещение.

При работе форвакуумного насоса возникают низкочастотные шумы, лежащие в диапазоне частот до 400 Гц. В результате гигиенических исследований установлено, что шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. При длительном воздействии шума

на организм происходят нежелательные явления: снижается острота зрения и слуха, повышается кровяное давление, снижается внимание. Сильный продолжительный шум может стать причиной функциональных изменений сердечно – сосудистой и нервной систем.

В соответствии с [48] допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием составляет 75 дБ. А, следовательно, средства и методы защиты от шума должны обеспечить уровень шума на рабочем месте не выше 75 дБ А.

Еще одним негативным фактором при работе форвакуумного насоса является вибрация, приводящая тело человека или его отдельные части в колебательное движение. Различают поперечные и продольные колебания. В зависимости от воздействия на человека вибрация делится на местную и общую. Общая вибрация вызывает сотрясение всего человека, а местная вовлекает в колебательное движение только отдельные части тела. Систематическое воздействие общих вибраций может быть причиной вибрационной болезни – стойких нарушений физиологических функций организма, обусловленных преимущественно воздействием вибраций на центральную нервную систему. Эти нарушения проявляются в виде головных болей, головокружения, плохого сна, пониженной работоспособности, плохого самочувствия, нарушений сердечной деятельности. Локальная вибрация вызывает спазмы сосудов, которые, начинаясь с пальцев, распространяются на всю кисть, предплечье и охватывают сосуды сердца. Одновременно наблюдается воздействие вибраций на нервные окончания, мышечные и костные ткани, выражающиеся в нарушении чувствительности кожи, окостенений сухожилий, болях и отложениях солей в суставах.

Для снижения уровня шума и вибрации форвакуумный насос помещается внутрь ящика, который покрыт с внутренней стороны войлоком толщиной 20 – 25 мм. Под основание насоса подкладывается резина толщиной

15 мм. Одновременно ящик служит защитой от прикосновения к движущимся частям насоса.

Компьютеры на рабочем месте производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля, в случае с ПЭВМ. Согласно [49] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг рабочей зоны по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц — 25 В/м;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц — 250 нТл;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 25 нТл.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [49] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.3 Радиационная безопасность

Следует отметить, что согласно [50] ускоритель электронов «Астра-М» является источником ионизирующего излучения закрытого типа.

Основным фактором опасности при работе ускорителя является тормозное рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронов в материале мишени (образца) и на стенках вакуумной камеры ускорителя.

К работе с источниками излучения допускаются лица, не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний.

Перед допуском к работе с источниками излучения персонал должен пройти обучение, инструктаж и проверку правил по безопасному ведению работ и действующих в организации инструкций. Проверка знаний правил безопасности работы в организации проводится комиссией до начала работ и периодически, не реже одного раза в год, а руководящего состава - не реже 1 раза в 3 года. Лица, не удовлетворяющие квалификационным требованиям, к работе не допускаются.

При проведении работ с источниками излучения не допускается выполнение операций, не предусмотренных инструкциями по эксплуатации и радиационной безопасности, если эти действия не направлены на принятие экстренных мер по предотвращению аварий и других обстоятельств, угрожающих здоровью работающих.

В помещении высоковольтного зала при включенном высоком напряжении запрещается присутствовать любому сотруднику.

Защита от всех видов ионизирующих излучений, возникающих при работе ускорителя, должна проектироваться таким образом, чтобы суммарная доза облучения персонала и населения не превышала величин, указанных в НРБ99/2009, а именно 50 мЗв/год (для персонала, относящегося к группе А).

Во время проведения пусконаладочных работ при достижении максимальной расчетной энергии, тока ускоренных электронов должны быть измерены уровни излучений на внешней поверхности защитных конструкций. Измеренные уровни ионизирующего излучения не должны превышать заданных в проекте величин. Результаты проверки эффективности

радиационной защиты регистрируются в акте приемке ускорителя в эксплуатацию.

В таблице 5.3 приведены виды влияния рентгеновского излучения на организм человека при различных дозах облучения.

Таблица 5.3 - Влияние рентгеновского излучения на организм человека (кратковременное полное облучение физически здорового человека).

Эффект	Доза, мЗв	Вероятность
Наивысшая допустимая доза	750	
Лучевая болезнь	1500	50%
	2250	100%
Смертельный исход	2500	5%
	4000	50%
	6000	100%

Для защиты персонала от ионизирующих излучений управление ускорителем размещается в отдельном от источника излучения (диодного узла ускорителя) помещении (пультовой). Входная дверь в высоковольтный зал, где находится ускоритель и в пультовую, блокируется с включением высокого (ускоряющего) напряжения так, чтобы исключить возможность случайного облучения персонала.

5.4 Электробезопасность

Согласно [51], электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля, статического электричества.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими установками в условиях повышенной влажности

(относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрооборудования;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклЮчение в корпуса электропоражающих элементов.
- заклЮчение в корпус токоведущих частей) [52].

Для уменьшения электроопасности приняты следующие технические решения:

- все электрооборудование соединяется с шиной заземляющего устройства заземляющими проводниками сечением более 4 мм² ($R_3 = 4 \text{ Ом}$);
- все токоведущие части установок ограждены и расположены таким образом, что исключается случайное касание их;
- внутри помещения нулевой провод присоединяется к заземляющему устройству у каждого щитка;
- сопротивление петли фаза – ноль не превышает 0,2 Ом;
- в электроустановке с заземлением до 1000 В с глухо-заземленной нейтралью имеется металлическая связь корпуса с заземляющей нейтралью электроустановки.

При поражении работающего сотрудника электрическим током необходимо выполнить следующее:

- выключить рубильник силового шкафа;
- освободить пострадавшего от тока, соблюдая собственную безопасность;
- освободить пострадавшего от стесняющей одежды;
- приступить к искусственному дыханию (если у пострадавшего наблюдается расстройство дыхательной функции).

Одновременно другое лицо, не занятое пострадавшим, должно:

- вызвать скорую помощь (тел. 03);
- удалить посторонних с места происшествия;
- сообщить о происшествии администрации института и инженеру по охране труда НИИ ВН.

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

Понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором исключается возможность пожара. В случае возникновения пожара в

первую очередь необходимо предотвратить воздействие его на людей и обеспечить защиту материальных ценностей, находящихся в зоне горения или вблизи от нее.

Согласно [46], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

Пожарная профилактика в производственных зданиях – это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечения безопасности людей; предотвращение пожаров, ограничение его распространения, а также создание условий для его успешного тушения.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве

электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Также проводятся мероприятия по предупреждению КЗ, обеспечению защиты сетей (реле, автоматы, плавкие предохранители), снижению контактных соединений, защите от окисления (спецсмазка).

Электрооборудование выбирается с учетом взрыво- и пожароопасности производства и условий ТП.

В пожароопасных зонах применяются машины закрытого исполнения, пульт управления – в пылезащитном исполнении.

Проектирование и монтаж электрооборудования в пожароопасных зонах производится в соответствии с инструкцией, где есть указания по монтажу электропроводки, двигателей и так далее [53].

Для обеспечения пожарной безопасности при работе на импульсном ускорителе электронов должно быть обеспечено наличие:

- углекислотным огнетушителем - 1 шт.;
- пенным огнетушителем - 1 шт.;
- ящиком с песком и совком - 1 шт.

В случае возникновения пожара необходимо:

- выключить рубильник электропитания установки;
- принять меры для ликвидации очага пожара, используя средства пожаротушения: огнетушители, противопожарный пожарный песок;
- если пожар ликвидировать не удастся, необходимо немедленно вызвать по телефону пожарную команду (тел. 01) и сообщить администрации института.

Выводы по разделу

В данной главе были определены вредные и опасные факторы, формируемые при разработке устройства для определения средней кинетической энергии электронов, среди которых можно выделить повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенный уровень шума, наличие токсичных веществ пожаровзрывоопасность, радиационная опасность. Описаны методики снижения воздействия вредных факторов, а также

регламент действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, к которым могут привести опасные факторы.

Заключение

В ходе проделанной работы было создано и испытано устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов по сечению пучка.

Испытания разработанного устройства показали возможность его использования для диагностики импульсного электронного пучка. Ошибка измерений полной энергии пучка электронов секционированным калориметром не превышает $\pm 8\%$, интегральным - $\pm 5\%$. Ошибка измерения полного заряда пучка не более 5% для секционированного и интегрального цилиндров Фарадея. Исследовано распределение энергии по сечению импульсного электронного пучка ускорителя «Астра-М». Распределение энергии по сечению импульсного электронного пучка ускорителя «Астра-М» отличается для электронов с разной кинетической энергией. Наибольшая неоднородность плотности распределения энергии показана для электронов с энергией менее 85 кэВ.

Таким образом, испытания разработанного устройства показали возможность его использования для диагностики импульсного электронного пучка. Прибор имеет возможность для последующей модернизации: снятия заряда с каждой отдельной секции и численного определения кинетической энергии электронов по сечению пучка.

Список публикаций

1. Egorov I. S. , Serebrennikov M. A. , Isakova Y. I. , Poloskov A. V. Sectioned calorimeter for quick diagnostic of the electron beam energy distribution // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2017 - Vol. 875. - p. 132-136;
2. Egorov I. S. , Remnyov G. E. , Poloskov A. V. , Serebrennikov M. A. Effect of emission current delay on the efficiency of electron beam production // Vacuum. - 2017 - Vol. 143. - p. 428-432;
3. Poloskov A. V. , Egorov I. S. , Serebrennikov M. A. Design and testing of fluid resistor for repetitive high-voltage pulse generator // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 830, Article number 012047. - p. 1-5;
4. Poloskov A. V. , Egorov I. S. , Ezhov V. V. , Serebrennikov M. A. Commutation of a capacitive energy bank by pseudospark switcher in self-breakdown mode // Известия вузов. Физика. - 2016 - Т. 59 - №. 9/3. - С. 9-11;
5. Egorov I. S. , Poloskov A. V. , Serebrennikov M. A. , Isemlerlinova A. A. Research of Energy Density for Pulsed Electron Beam of Wide Electron Kinetic Energy Spectrum // 20th International Symposium on High-Current Electronics: Proceedings, Tomsk, September 16-22, 2018. - [S.l]: IEEE, 2018 - p. 27-30;
6. Серебренников М. А., Егоров И. С., Полосков А. В. Оптимизация конструкции секционированного калориметра для исследования свойств электронных пучков круглого сечения // Двадцать четвертая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: материалы, Томск, 31 Марта-7 Апреля 2018. - Екатеринбург: АСФ России, 2018 - С. 201-202;
7. Egorov I. S. , Poloskov A. V. , Ezhov V. V. , Serebrennikov M. A. Design and testing of fluid resistor for repetitive high-voltage pulse generator // Energy Fluxes and Radiation Effects: Abstracts of International Congress, Tomsk, October 2-7, 2016. - Tomsk: TPU Publishing House, 2016 - p. 122;

8. Poloskov A. V. , Egorov I. S. , Ezhov V. V. , Serebrennikov M. A. Commutation of a capacitive energy bank by pseudospark switcher in self-breakdown mode // Energy Fluxes and Radiation Effects: Abstracts of International Congress, Tomsk, October 2-7, 2016. - Tomsk: TPU Publishing House, 2016 - p. 124;
9. Serebrennikov M. A., Egorov I. S. Computer model of the «Astra» pulsed electron accelerator [Electronic resorces] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, Томск, 3-6 Июня 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 210-211.

Список использованных источников

1. Пикаев А.К. Экологические применения радиационной технологии (Обзор), Химия высоких энергий. 1994. Т. 28, № 1. С. 5–16.
2. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии: сборник научных статей, Академия наук СССР (АН СССР), Сибирское отделение (СО), Институт сильноточной электроники (ИСЭ) ; под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1983. 168 с.
3. Диденко А.Н, Григорьев В.Н., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 280 с. 4. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 225 с.
4. Немытов П.И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2010.
5. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986, С 165–172.
6. Pikaev A.K. New data on electron-beam purification of wastewater // Radiation Physics and Chemistry. 2002. Vol. 65, Iss. 4–5. P 515–526.
7. Kim Y., Kim J., Han B. et al. Application of an electron accelerator for the treatment of wastewater from textile dyeing industries // Journal of the Korean Physical Society. 2011. Vol. 59, №. 61. P 3489–3493.
8. Егоров И. С. Разработка и исследование импульсного ускорителя с учётом запаздывания электронной эмиссии в диоде: Автореф. дис...канд. техн. наук. - Томск, 2015 - 109 с.
9. Степовик А. П., Хмельницкий Д. В. Диагностика мощных пучков электронов с помощью калориметров полного поглощения, Прикладная механика и техническая физика – 2003 - Том 44 - № 4 - с. 4-11.

10. Избасаров Д. С., Пушкарёв А. И., Разработка методики измерения параметров сильнотоочного электронного пучка, Современные техника и технологии: сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2011 — Том 1 — с. 58-60.

11. Избасаров, Д. С., Исакова Ю. И, Холодная Г. Е., Тепловизионная диагностика параметров сильнотоочного электронного пучка, Перспективы развития фундаментальных наук. — Томск: Изд-во ТПУ - 2011 — с. 232-234.

12. Pushkarev A., Kholodnaya G., Sazonov R., and Ponomarev D., Thermal imaging diagnostics of high-current electron beams, Review Of Scientific Instruments – 2012 - Vol. 83 - № 10.

13. Egorov I. S. , Serebrennikov M. A. , Isakova Y. I. , Poloskov A. V., Sectioned calorimeter for quick diagnostic of the electron beam energy distribution , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2017 - Vol. 875 - p. 132-136.

14. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск, Параллель, 2009, 294 с.

15. Brown K. L., Tautfest G. W., Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams, Review Of Scientific Instruments – 1956 - Vol. 27 - № 9 - p. 696-702.

16. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980. 156 с.

17. Князев Б.А., Мельников П.И., Никифоров А.А., Чикунов В. В. Измерение энергетического спектра мощного микросекундного РЭП в пучково-плазменных экспериментах многофольговым анализатором, Журнал технической физики – 1993 – Том 63 - № 6 – с. 179 – 188.

18. Венедиктов Н.П., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Моисеев М.А., Постникова А.С., Исследование энергетического спектра электронного пучка после взаимодействия с ВЧ

полем в гиротроне, Журнал технической физики – 2000 – Том 70 - № 12 – с. 63 – 66.

19. Egorov I., Esipov V., Remnev G. et al., A high-repetition rate pulsed electron accelerator, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation – 2013 - Vol. 20 - № 4 - p. 1334–1339.

20. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология, пер. с нем.: Энергия, 1980, 528 с.

21. Allis W. P. Motions of ions and electrons. - In: Flugge S. Handbuch der Physik, Bd 21. Elektronen-Emission, Gasentladungen. - Springer-Verlag, 1956, S. 408-412.

22. Christenhusz R., Reimer L. Schichtdickenabhängigkeit der Warmeerzeugung durch Elektronenstrahlung im Energiebereich zwischen 9 - 100 keV.- Z. angew. Phys., 1967, Bd 23, S. 397-404.

23. Бекман И. Н. Ядерная физика: курс лекций; Моск. гос. ун-т им. Ломоносова, Химический фак, Кафедра радиохимии, 2010, 511 с.

24. Heinrich H. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Intensitätsverteilung im Strahlungsfeld von Elektronenbeschleunigern und der Dosisverteilungen in elektronenbestrahltem Material. Diss. AdV-DDR, 1973.

25. Birkhoff R. D. The passage of fast electrons through matter. - In: Flugge S.: Handbuch der Physik, Bd 34. Korpuskeln und Strahlung in Materie, 2. Aufl.- Heidelberg: Springer-Verlag, 1958, s. 128-131.

26. Klein W. Positive Temperaturkoeffizienten und das Problem der Sättigung der Lumineszenz von ZnS-Einkristallen bei Anregung mit Elektronenstrahlen. Diss. Freie Univ. Berlin, 1962.

27. X. Yu, J. Shen, M. Qu, W. B. Liu, H. W. Zhong, J. Zhang, Y. Y. Zhang, S. Yan, G. L. Zhang, X. F. Zhang, and X. Y. Le, Characterization and analysis of infrared imaging diagnostics for intense pulsed ion and electron beams, Vacuum – 2015 – Vol. 113 - № 36.

28. Morgan A.F.D. Design of the Faraday Cups in Diamond, Proc. of DIPAC 2005. Lyon, France, 2005.
29. Suwada T., Ohsawa S., Furukawa K. et al. Recalibration of a WallCurrent Monitor Using a Faraday Cup for the KEKB Injector Linac, Proc. of PAC 1999. New York, USA, 1999. 284
30. Shaw J., Averill R., Kowalski S. et al. A High Power Faraday Cup to Measure Extracted Beam Current from the Bates South Hall Ring, Proc. of PAC 1997. Vancouver, Canada, 1997.
31. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
32. Окунь Н.Б. Измерение разрядных токов поясами Роговского // ПТЭ. 1968. № 6. С. 120–126
33. Шкуратник В.Л. Измерения в физическом эксперименте: учебное пособие / В. Л. Шкуратник. М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 1996. 270 с.
34. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термопар: Справ. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
35. Цифровой запоминающий осциллограф TDS2000B [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.tek.com/oscilloscope/tds2000-digital-storage-oscilloscope>.
36. Remnev G.E., Furman E. G., Pushkarev A.I., Kondratiev N. A., Goncharov D.V. et al., A high-repetition rate pulsed electron accelerator, IEEE Transactions on Fundamentals and Materials – 2004 - Vol. 124 - № 6 - p. 491–495.
37. Melexis MLX90614ESF-DCI datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90614-datasheet-melexis.pdf>
38. Резисторы постоянные неперывочные ТВО [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://chipinfo.pro/datasheets/rezistors/tvo.htm>

39. Чуваши-кабель, РК-75-4-11 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://chuvashcable.ru/ru/katalog/katalog-produkczii/radiochastotnyie-kabeli/s-polietilenovoj-izolyaczij/rk-75-4-11-rk-75-4-15>
40. Melexis MLX90614ESF-DCI datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90614-datasheet-melexis.pdf>
41. Arduino.ru, Arduino Nano [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano>
42. ArduinoMaster, Датчик температуры Arduino DS18B20 Arduino Nano [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arduino-master.ru/datchiki-arduino/arduino-ds18b20/>
43. Углеродные волокна на основе вискозной технической нити [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://him-prom.perm.ru/index.php?id=9>
44. Berger M., Coursey J., Zucker M., Chang J. Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions// NIST
45. Standard Reference Database 124 DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>
46. Федеральный закон "Об основах охраны труда" от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
47. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования.
48. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума.
49. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы "Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы".
50. ГОСТ Р 52241-2004. Источники ионизирующего излучения радионуклидные закрытые. Классы прочности и методы испытаний.
51. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
52. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.

53. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

54. Особенности переработки стирольных пластиков [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plastinfo.ru/information/articles/73/>

55. Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1117

Приложение А

Раздел 1

Устройство для регистрации средней кинетической энергии электронов в сечении пучка

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Серебренников Максим Анатольевич		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н., доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Демидова О.М.	Старший преподаватель		

1. Design and manufacturing of the device for determination of electron average kinetic energy in the cross section of the beam

1.1 Device design

The device for determination of electron average kinetic energy in the cross section of the beam was developed to measure the parameters of beams generated by pulsed accelerators (up to 500 keV, 0.2-10 kA, 50-100 cm², 0.05-10 J/cm²) at the Laboratory of beam and plasma technologies of Tomsk Polytechnic University. From the experience of operation of such accelerators, it was noted that the depressurization of the vacuum chamber of the electron diode during the installation of the device can lead to a notable change in the parameters of the electron beam during the first pulses. Therefore, special attention was paid to the design of a device capable to measure the electron beam parameters injected into the atmosphere.

1.1.1 General design

General layout of the device is shown in Figure A1. The mounting flange (7) is installed from the outside of the exit window (1) of the accelerator (4). A device is mounted in the mounting flange and contains the main elements such as the collector (5) with copper sections (2), the unit with contactless temperature sensors MLX90614ESF-DCI (6), the Faraday cup (FC) shunt (11). The collector casing is made of plastic and protected from the destructive effect of the electron beam by the screen (3). Each section of the collector is connected to the FC shunt by wire MGTF-0.12 (8). From the FC shunt, the signal is transmitted by a coaxial cable RC-75-4-11 (13) to a Tektronix TDS2024C oscilloscope (17). The temperature sensors are controlled by the I2C protocol by the ATmega328 controllers based on the Arduino Nano platform (15) and are connected with use of jumper cables (10). The temperature measurement system is controlled from a computer (14) connected to the controllers by a USB cable (16).

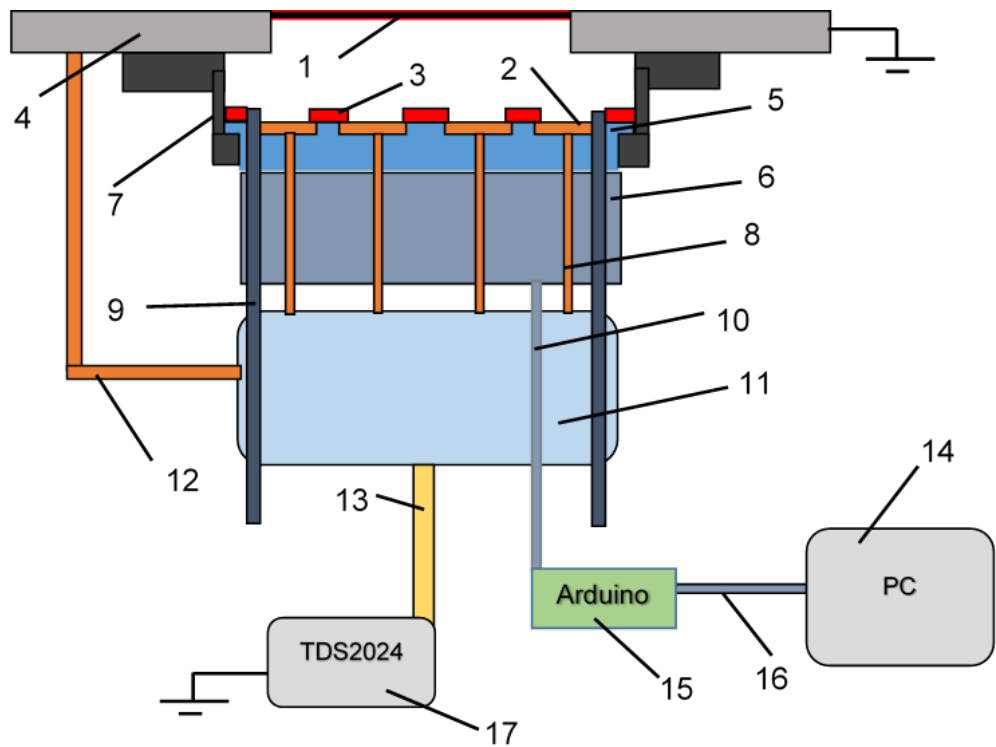


Figure A1 - Measurement scheme by the device for determination of electron average kinetic energy in the cross section of the beam: 1 - exit window of the accelerator; 2 - copper section; 3 - protective screen; 4 - accelerator case; 5 - collector; 6 - temperature sensor unit; 7 - mounting flange; 8 - conductor; 9 - mounting stud; 10 - jumper wires; 11 - FC shunt; 12 - grounding shunt; 13 - RC-75-4-11 cable; 14 - personal computer; 15 - Arduino Nano controller box; 16 - USB cable; 17 - oscilloscope.

The size of the sections and the collector casing was selected based on tests at the «TEU-500» accelerator (500 keV, 0.55 J/ cm² per pulse, 60 ns at FWHM) [36]. The 3D model of the device without switching wires and sensors can be seen in Figure A2.

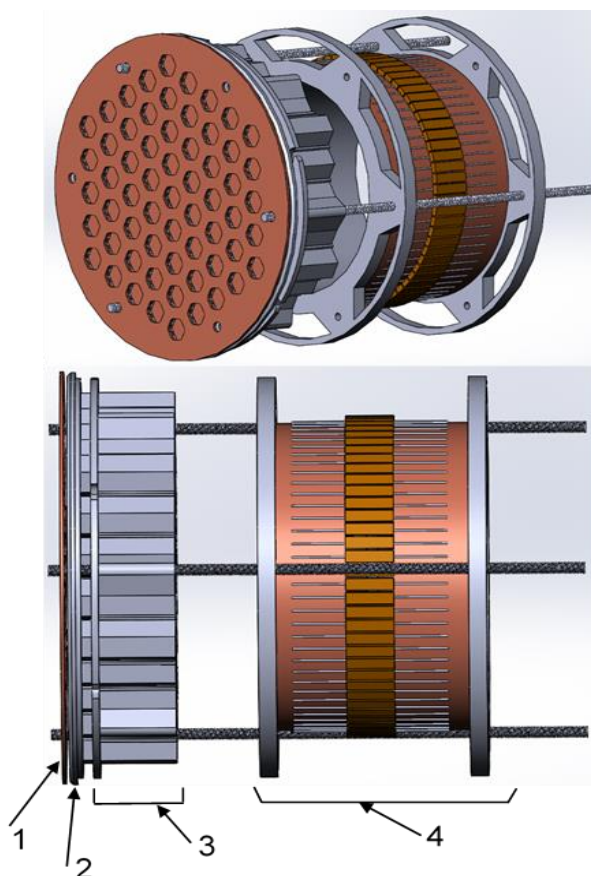


Figure A2 - External view of the device main components: 1 - protective screen; 2 - a collector with a matrix of sections; 3- casing of the temperature sensor unit; 4 - FC shunt.

The shape and size of the main device components allow placing the device in cylindrical chambers with a diameter of 125 mm and a length of 30 cm.

1.1.2 Design of the sectioned collector

In developing the design of the sectional collector, the following conditions were taken into account:

- 1) the thickness of the target should be larger than the maximum range of the beam particles, i.e. the beam should be totally stopped in the target;
- 2) the front and rear surfaces have achieved thermal equilibrium, i.e. the temperature field distribution along the target depth should be uniform;
- 3) the lateral thermal conduction is weak;

4) no obvious thermal ablation is present.

As mentioned above, the main idea in the device designing was to create a collector structure in the form of a of sensitive elements (sections) matrix. Section are reliable insulated from each other and are used to measure beam parameters. Thus, the construction shown in Figure A3 was proposed.

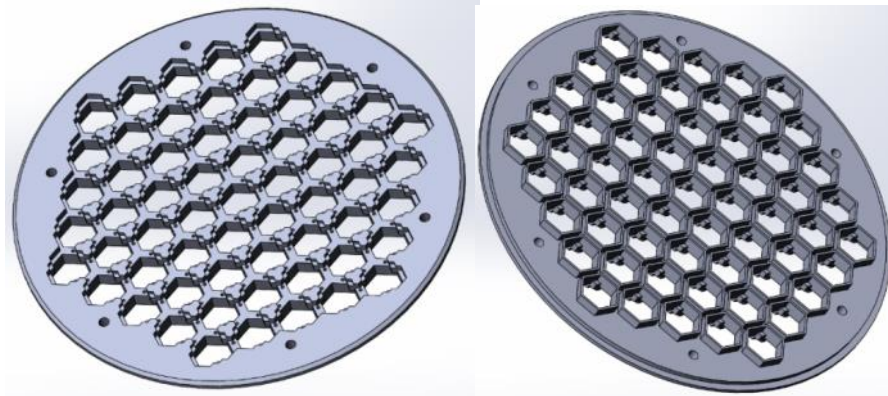


Figure A3 – External view of the collector casing without copper sections

The collector has a disk shape with a diameter of 129 mm and a thickness of 6.7 mm. The design provides for the possibility of soldering each of the 61 sections from the end side. Special grooves for wiring same length cables from each section to the FC shunt are designed on the reverse side of the collector.

The hexagonal sections have an inscribed circle diameter of 10.5 mm and a thickness of 0.5 mm. The total area of the sections is about 29% of the total area of the collector, which can be used in calculating the total energy and charge transferred to the collector during beam irradiation. It is worth noting the special design of sections mounting, which ensures reliable fixation of the section in the collector casing with the small contact area (Figure A4).

ABS-plastic was chosen as a material for the casing. This material can be 3D-printed and provide necessary conditions of low thermal conductivity and heat capacity.

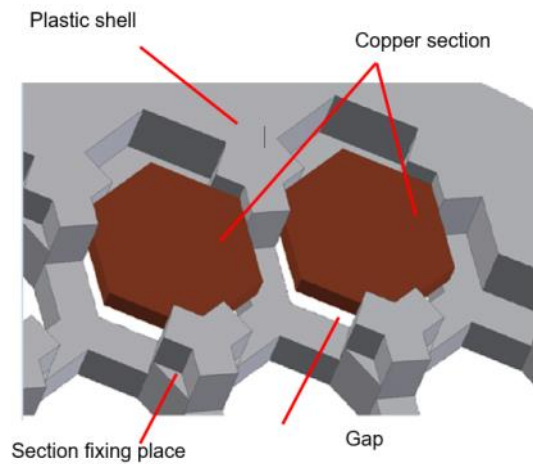


Figure A4 – Collector structure

Copper alloy M1 (99.9% of Cu) has been selected as material for the sections with which readings are taken. This alloy has a high thermal conductivity and a relatively low coefficient of thermal capacity. This is necessary to reduce the internal temperature gradient (temperature difference in different locations). Relatively high threshold of ablation of copper with adequate mechanical properties of the alloy M1 makes it the preferred material for the collector.

Sections were painted with black lusterless acrylic coating ($\varepsilon = 0.9$) on the rear surface to increase the infrared radiation from the material.

Such characteristics as the maximum electron range in the collector sections, heat losses from the surface of the sections due to thermal conductivity, radiation and convection, temperature equilibration time on opposite sides of the section after electron beam irradiation were calculated for the purpose of checking and fitting the device design proposed above.

It is necessary that the electron beam be absolutely absorbed in the section to contribute its energy completely. Thus, the issue of the determination of electron penetration depth in copper occurs. There is a projective range of electrons, determined by the minimum thickness of the material, measured in the direction of the initial velocity of the beam and corresponding to the total absorption of electrons. The numerical value can be calculated using the formula, covered in review:

$$S \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{U_B^{5/3}}{\rho},$$

where $U_B = 260$ kV – accelerating voltage; $\rho = 8.96$ g/cm³ – copper density.

According to the formula $S \approx 0.01$ cm is a projective range for electron in copper with energy $E \leq 1$ MeV.

To take into account the thermal energy loss due to radiation on both sides of the cell, it can be used the Stefan-Boltzmann formula:

$$j = \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2),$$

where $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W · m⁻² · K⁻⁴ is the Stefan-Boltzmann constant $\varepsilon_1 = 0.9$ is the emissivity on the rear side of the target; $\varepsilon_2 = 0.3$ is emissivity on the front of the target; T is the target temperature after irradiation; T₀ is the target temperature before irradiation.

Taking into account the above, the energy losses due to radiation at a temperature difference of 10 °C is about 10⁻⁴ % of the energy transmitted by the electron beam to the whole collector surface. Heat losses by convective heat transfer and thermal conductivity were evaluated during the experiments.

In previous work [13], we estimated the time of thermal equilibrium establishment in a copper section 1 mm thick after irradiating by an electron beam using the Elcut 6.2 program. The obtained results presented in Figure A5.

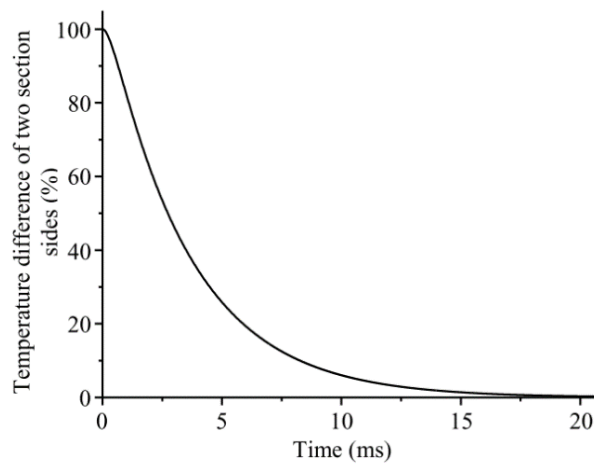


Figure A5 - Temperature difference between two opposite sides of the collector section [13]

Analysis of simulation results showed that even after 15 ms the difference in temperature between the sides was less than 1%, which agrees with the results obtained in [23]. In this iteration of the device a section has thickness only 0.5 mm, thus, thus the obtained results are acceptable. In other words, measurements are taken after the thermal equilibrium establishment.

1.1.3 Sensor unit design

The design of the sensor unit casing was developed in accordance with the shape of the matrix sections, the size of the collector, as well as the dimensions of the sensors themselves MLX90614ESF-DCI. The external view of the sensor unit without connecting wires is shown in Figure A6.

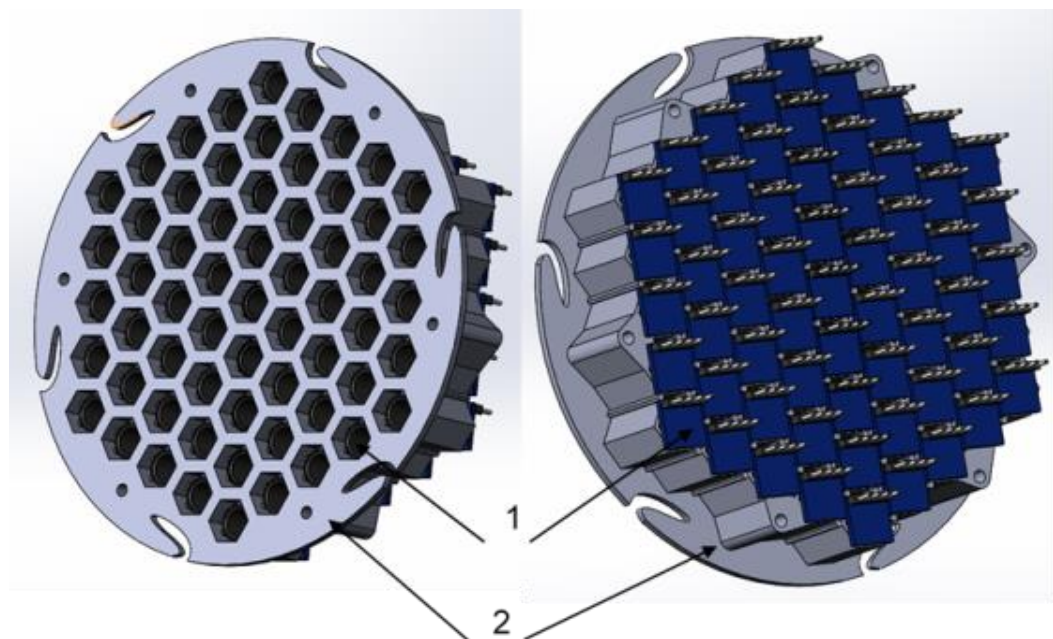


Figure A6 – External view of the sensor unit: 1 - MLX90614ESF-DCI sensors; 2 - casing.

ABS-plastic is used as the material for the casing, as in the case of the collector. The design provides thermal and electrical insulation of the sensors from each other.

1.1.4 Design of Faraday cup shunt

The design of the FC shunt is shown in Figure A7. The casing is also made of ABS plastic. The potential difference in the shunt is determined from two copper buses: a potential bus (1) and a ground bus (3) connected by resistors TVO-3E0C099 [38], (3 Ohms, 0.25 W) (2). Two hundred resistors are connected in parallel with a total resistance of 16 m Ω .

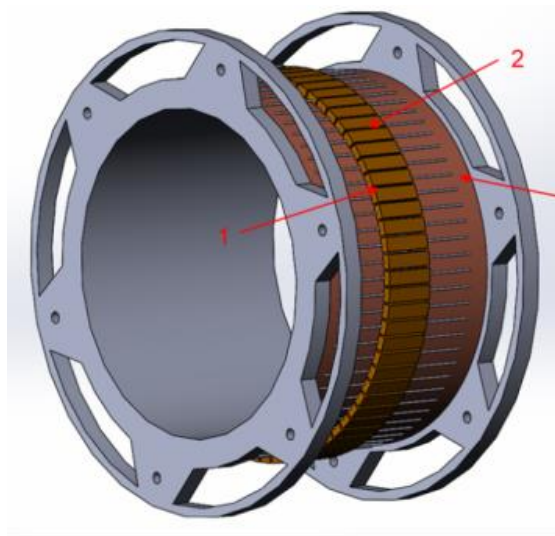


Figure A7 – External view of the FC shunt: 1 - potential bus; 2 - resistors TVO; 3 - grounding bus.

The voltage values at the FC are transmitted to the oscilloscope with use a coaxial cable RC-75-4-11 [39].

1.2 Electronics

As mentioned above, sixty-one non-contact temperature sensors MLX90614ESF-DCI [40] and four ATmega328 controllers on the Arduino Nano [41] platform are one of the most important components of the. The I2C protocol is used to communicate sensors and controllers. The connection between the controllers and the PC is established by USB. No additional power required.

1.2.1 Temperature sensors

The external view of the temperature sensors MXL90614ESF-DCI from Melexis [40] based on the GY-906 board is shown in Figure A8.



Figure A8 – External view of MXL90614ESF-DCI [40]

The sensors are programmed using the already mentioned ATmega328 controllers in the Arduino IDE program.

The advantages of such sensors are relatively simple automation, compactness, good accuracy in contactless measurement conditions.

Table A1 - Main characteristics of the MXL90614ESF-DCI sensor [40]

Parameter	Value
Supply voltage, V	3
Measurement range, °C	-40 - 85
Number of thermopiles	1
Field of view, °	5
Accuracy, °C	up to $\pm 0,2$
Focal length, m	up to 1

It is important to understand that this accuracy is guaranteed when the sensor is in thermal equilibrium and in isothermal conditions, at a focal distance from the measured object being [40]. These conditions are provided by the device design.

The range of measured temperatures in our experiments is estimated to range from 20 to 40 degrees Celsius, thus, we can use the following graph:

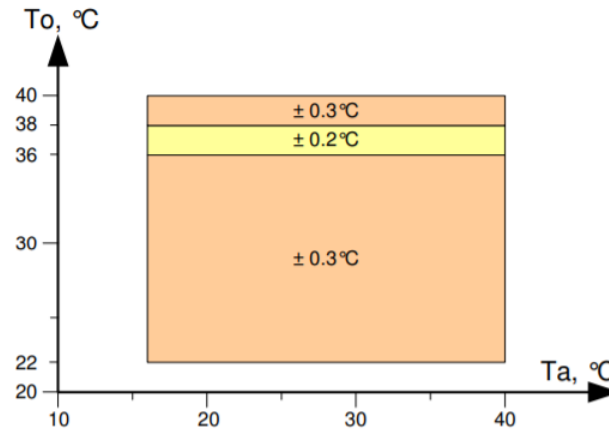


Figure A9 – Accuracy of MXL90614ESF-DCI depending on the temperature of the sensor casing T_a and the temperature of the measured object T_o [40]

As mentioned above, the accuracy of the sensors, under necessary conditions, vary from ± 0.2 to ± 0.3 °C, which is quite acceptable in our experiments.

Figure A10 shows the dependence of the value of the incoming signal on the angle of infrared radiation incidence.

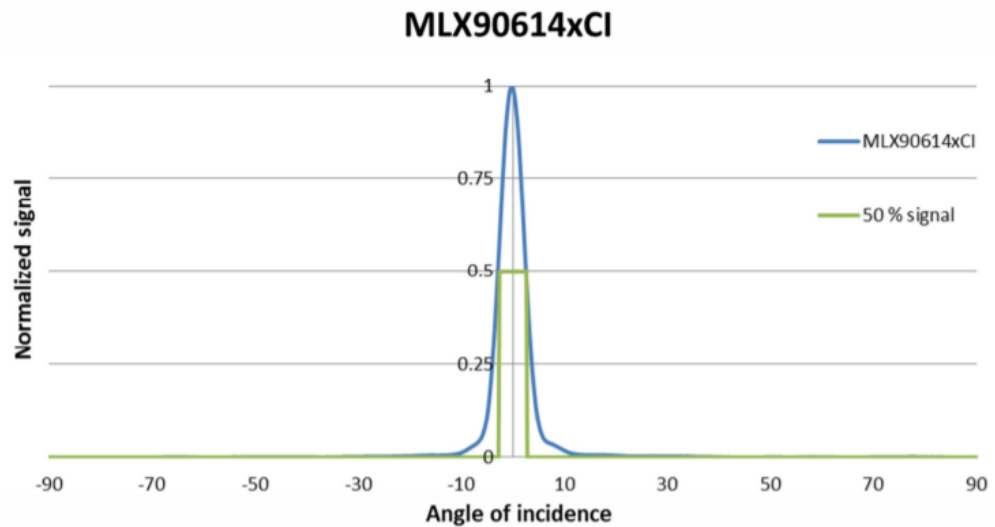


Figure 10 – Typical MLX90614DCI field of view

The design of the collector and sensor unit provides the optimum angle of radiation incidence on the sensitive element of the sensor [40].

1.2.2 Controllers

As mentioned above, Atmel Atmega328 was selected as the controller to control the sensor system based on the Arduino Nano boards [41].



Figure A11 – External view of Arduino Nano board [41]

Each board can provide power for up to 18 sensors, and the built-in UART allows transmitting data at speed 115200 baud.

Brief characteristics of the Arduino Nano are shown in Table A2.

Table A2 - The main characteristics of the Arduino Nano board (Atmega328) [41].

Microcontroller	ATmega328
Operating voltage (logic level)	5 V
Input voltage (recommended)	7-12V
Input voltage (limit)	6-20 V
Digital Inputs / Outputs	14 (6 can be used as PWM outputs)
Analog inputs	8
DC current through the input / output	40 mA
Flash memory	32 Kb
RAM	2 Kb
EEPROM	1 Kb
Frequency	16 MHz
Size	1.85 cm x 4.2 cm

These boards are widely distributed, have low cost, simple software and sufficient computing power.

1.3 Software

To control the device from a computer and subsequent easy data processing, a special program was developed in the Matlab R2018b package. Based on this program, a window application (GUI) was created. GUI does not require installation of the Matlab software itself, has the ability of quick install and using on any computer with a 64-bit Windows operating system, but not earlier than Windows 7 Service Pack 1.

To control the system of 61 sensors, four Arduino Nano controllers are used, three of which work with fifteen, and one works with 16 sensors (Figure A12).

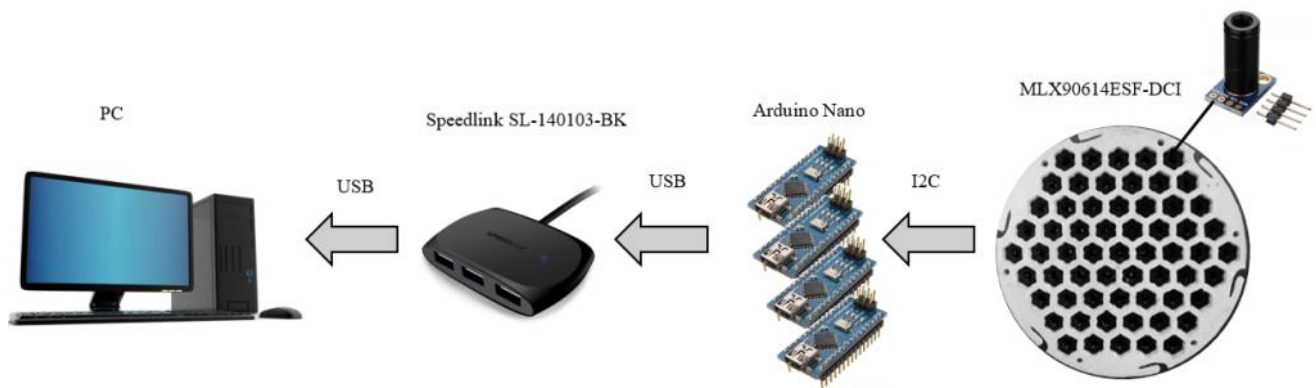


Figure A12 – Scheme of temperature measurement

Each controller and sensor has a unique firmware (fw) created in the Arduino IDE program. The uniqueness of the sensor fw is determined by its address and for controllers in the set of addresses of the controlled sensors by each individual Arduino. A map of sensors addresses, section numbers and division of the matrix into controlled sectors can be seen in Figure A13.

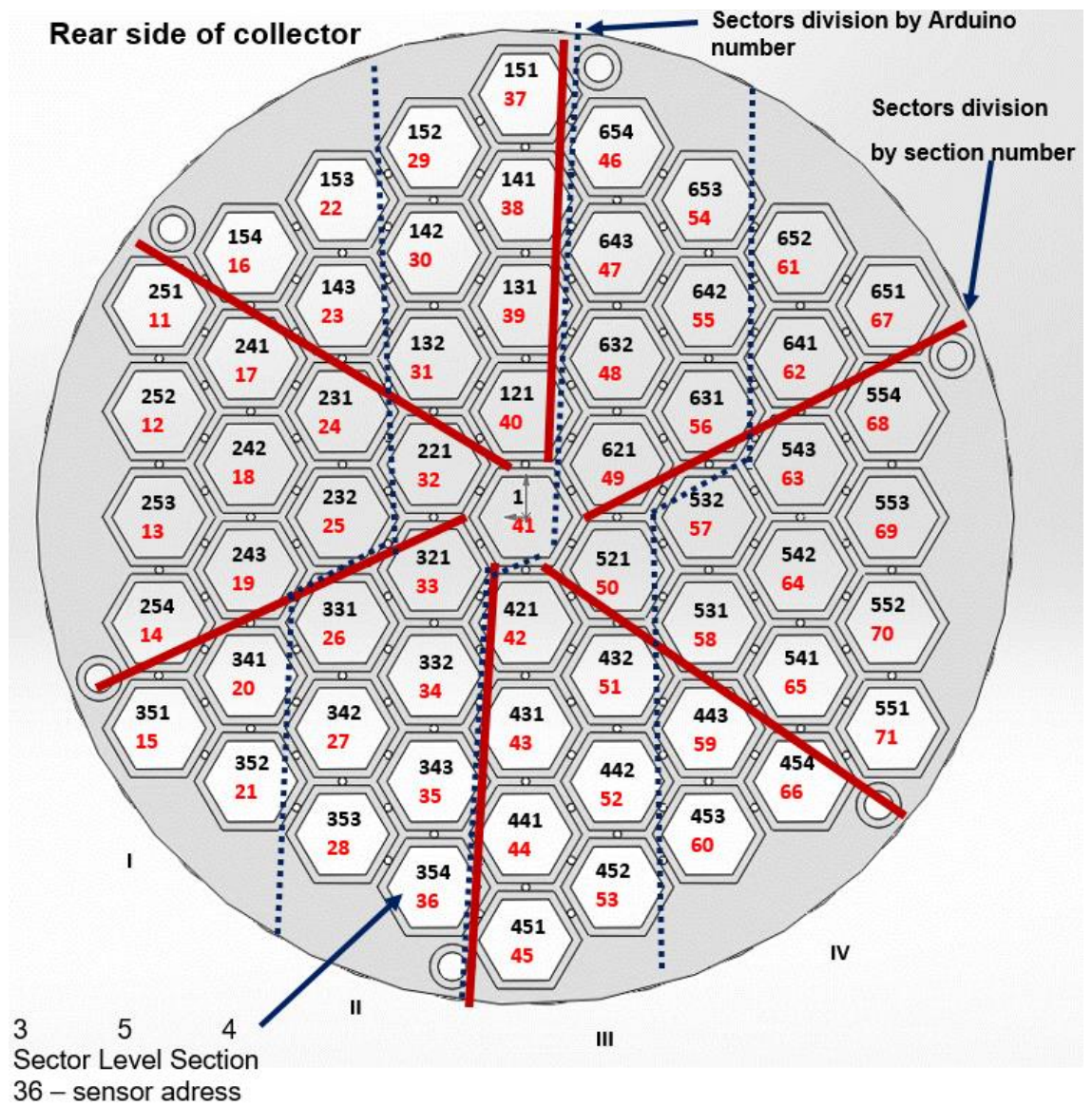


Figure A13 - Sensor addressing scheme and section number location

Such system allows to poll sensors with a frequency up to 40 Hz.

The interface of the window application is shown in Figure 14.

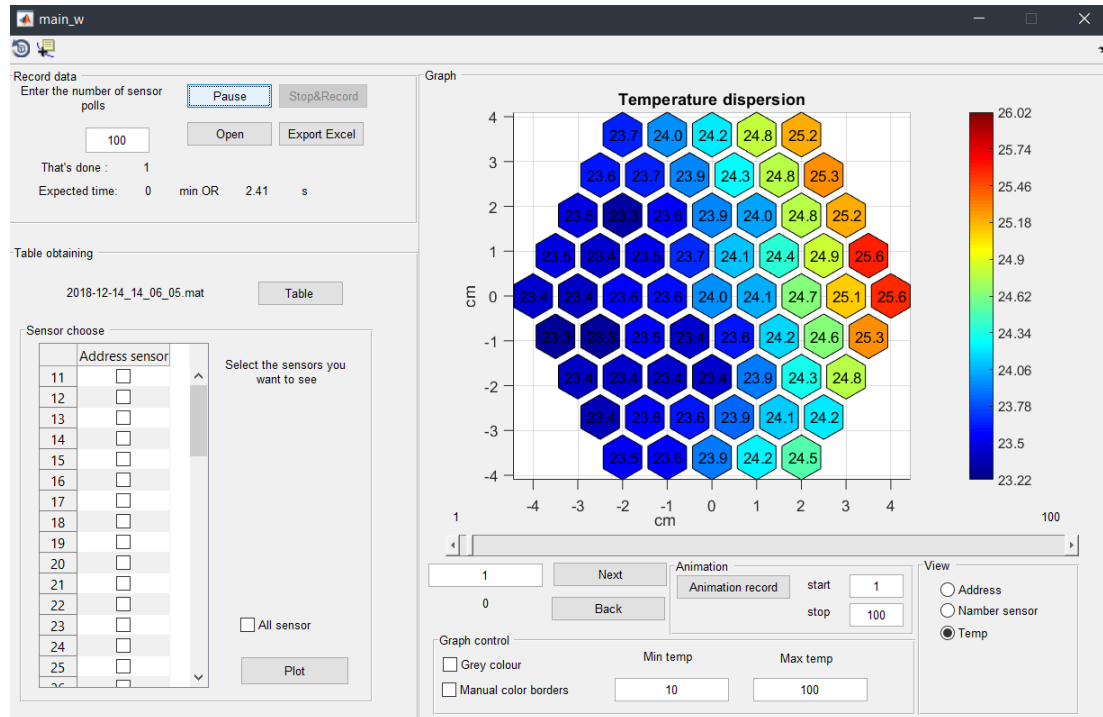


Figure A14 – Application interface for data processing

The main functions of the application:

1. Poll of the sensor system;
2. Data writing in ROM;
3. Presentation of experimental data in the form of tables .mat;
4. Formation of an Excel file with the obtained data;
5. Calculation of the energy released in the sections;
6. The output up of up to sixty-one one-dimensional graphs of temperature and energy on the sections;
7. Formation of 3D diagram with temperature and energy distribution across sectioned collector with a fixed or adaptive temperature scale;
9. Prediction of sensor poll time;
10. Data correction.

1.4 Assembling

The main stages of the calorimeter assembly:

1. 3D printing of collector, sensor unit and FC shunt casings;
2. Manufacturing of copper sections, FC buses, sensor busses and protective screen;
3. Connection of copper sections with a plastic collector casing, installation of sensor matrix;
4. Soldering of cables and resistors;
5. Installation of the main components of the device in a single assembly;

The main stages in the creation of the device are shown in Figure A15.

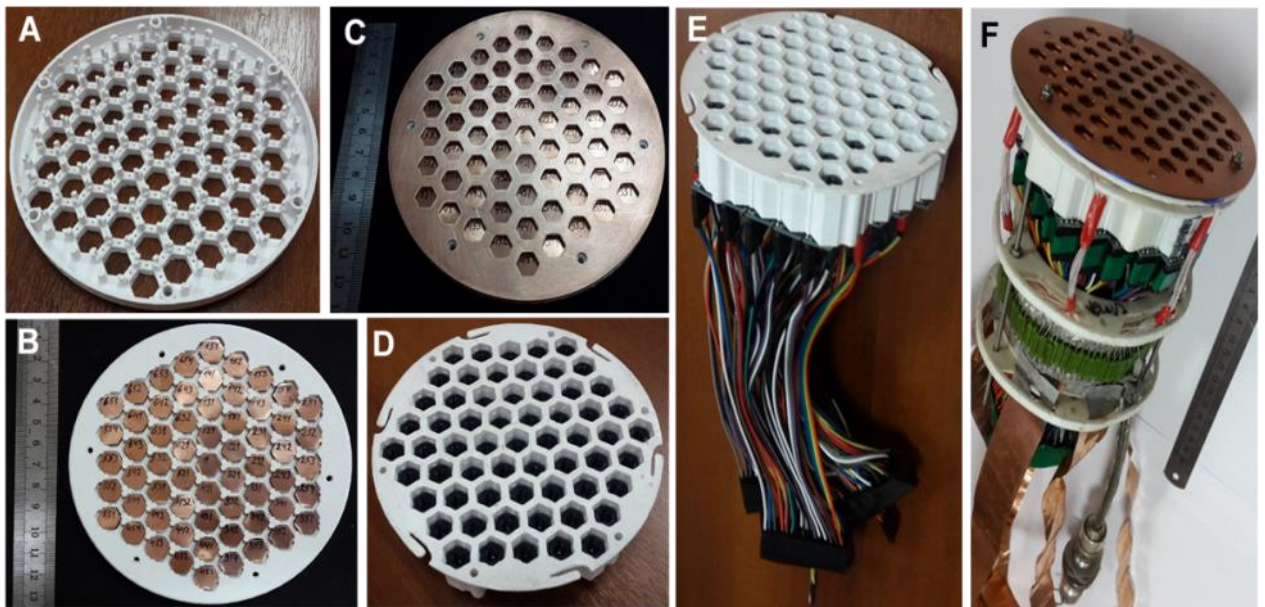


Figure A15 - Stages of the device assembly: A - 3D-printing of the main units; B - mounting and soldering sections; C - production and installation of a protective screen; D - mounting the sensor unit matrix; E - creation and installation of jumper cables and power supply buses of sensors; F - production of a FC shunt, final assembly of the main components into a single unit of the device

1.5 Sensors calibration

It is known that with a change of body temperature, its heat capacity and surface emissivity may change. To take into account these factors, it was decided to calibrate the MLX90604ESF-DCI sensors in device operating temperature range. In addition, calibration will allow determining a systematic error in temperature measurements.

In order to calibrate sensors an experimental stand (Fig. A16) was made.

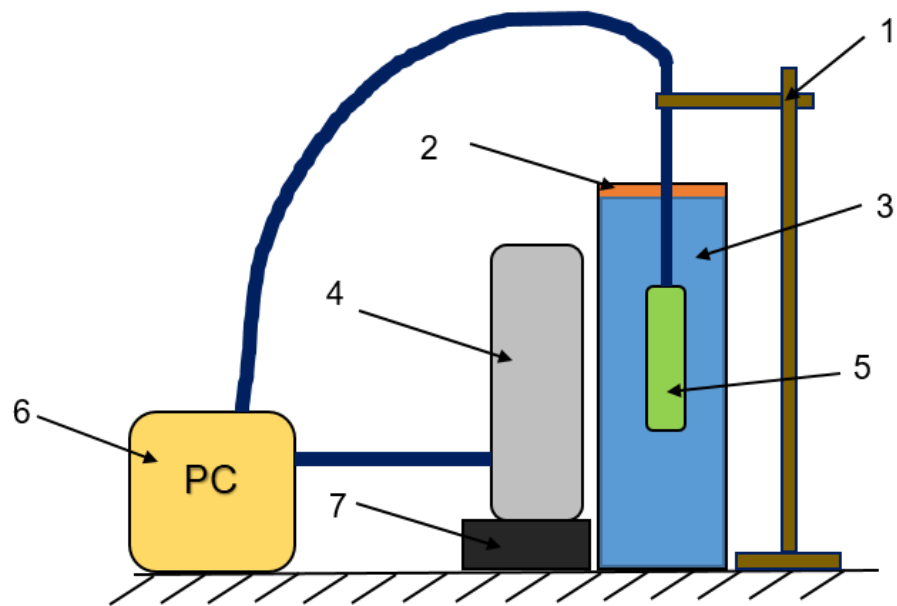


Figure A16 – Experimental stand for temperature sensors calibration: 1 - a tripod for mounting a thermocouple temperature sensor; 2 - copper cuvette; 3 - water; 4 –block of non-contact temperature sensors; 5 - thermocouple temperature sensor; 6 - personal computer; 7 – insulated pedestal

Water (3) with a temperature of about 50 ° C was poured into the copper cuvette (2), which corresponds to the upper limit of temperature measurements by the device. There was placed a temperature thermocouple sensor DS18B20 [42] (5). This sensor was also connected by an Arduino controller to a computer (6). One side of the cuvette it was painted with black acrylic coating, similar to the one used in the

blackening of the sections. On the same side, the MLX90604ESF-DCI temperature sensor unit was installed.

Thus, both sensor systems recorded a change of water temperature with cooling, assuming that the wall of the cuvette and water have approximately the same temperature. That is, the contactless sensors were calibrated relative to the thermocouple sensor. Calibration process consisted of three measurements series.

The dependence of the thermocouple sensor temperature readings on the readings of each MLX sensor was searched in the following form:

$$T_{\text{thermocouple}} = a_i \times T_{\text{contactless}i} + b_i,$$

where a_i , b_i are correlation coefficients, which are determined for each sensor by statistical means.

Figure A17 shows the water temperature changes in the cuvette: the blue curve is obtained from a thermocouple sensor, the red one is the result curve of averaging the temperature changes determined by all MLX sensors, taking into account calibration coefficients.

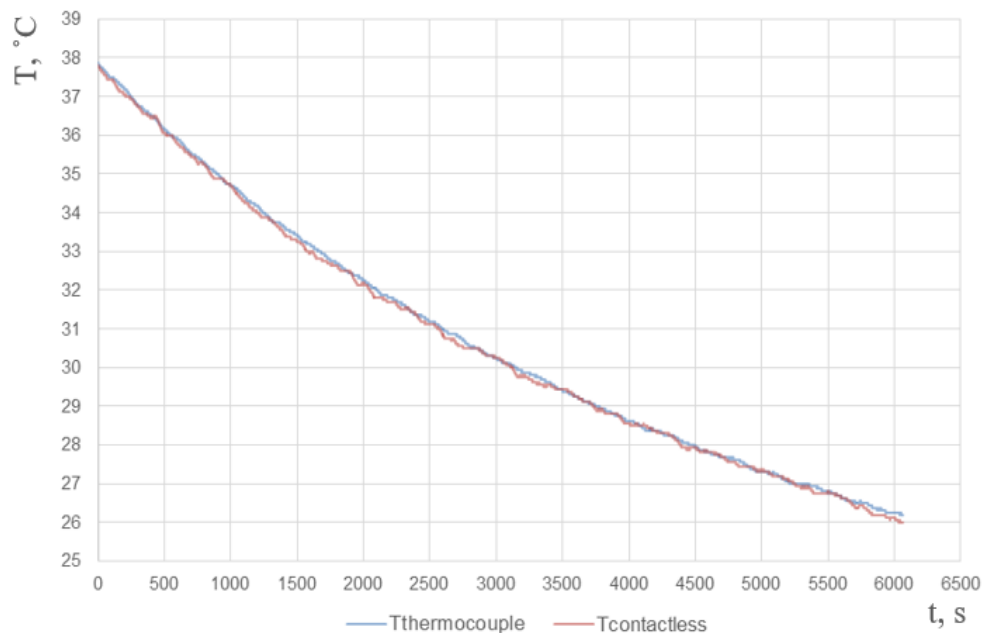


Figure A17 - Comparative graph of water temperature change in a cuvette

According to the results of the experiment, the calibration error is ± 0.4 °C

Приложение Б

Таблица Б1 - Справочные характеристики АБС-пластиков [54]

Характеристика	Величина
Плотность, г/см ³	1,02-1,05
Телостойкость по Вика, °С	94-97
Коэффициент теплового линейного расширения, $1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$	8-10
Усадка при литье под давлением, %	0,3-0,7
Твердость по Роквеллу (шкала R)	95-123
Твердость по Бринеллю при 20 °С, кгс/мм ²	9,4-15,6
Модуль упругости при статическом изгибе, кгс/см ²	$15 \cdot 10^3$ - $24 \cdot 10^3$
Ударная вязкость по Изоду, кДж/м ²	11-35
Водопоглощение за 24 ч при 20 °С, %	0,2-0,3
Светостойкость окраски	(1)
Термостойкость окраски	(2)
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,214
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	1,34-2,3

Таблица Б2 – Справочные характеристики сплава М1 меди [55]

Т	Е·10⁻⁵	α·10⁶	l	γ	С	R·10⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.28		387	8940	390	17.8
100	1.32	16.7				

Обозначения:

Т - Температура, при которой получены данные свойства, [Град];

Е - Модуль упругости первого рода, [МПа];

- а - Коэффициент температурного (линейного) расширения
(диапазон 20° - Т), [1/Град];
- l - Коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала),
[Вт/(м·град)];
- г - Плотность материала, [кг/м³];
- С - Удельная теплоемкость материала (диапазон 20° - Т), [Дж/(кг·град)];
- R - Удельное электросопротивление, [Ом·м].